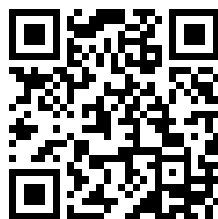

This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

GoogleTM books

<https://books.google.com>





A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

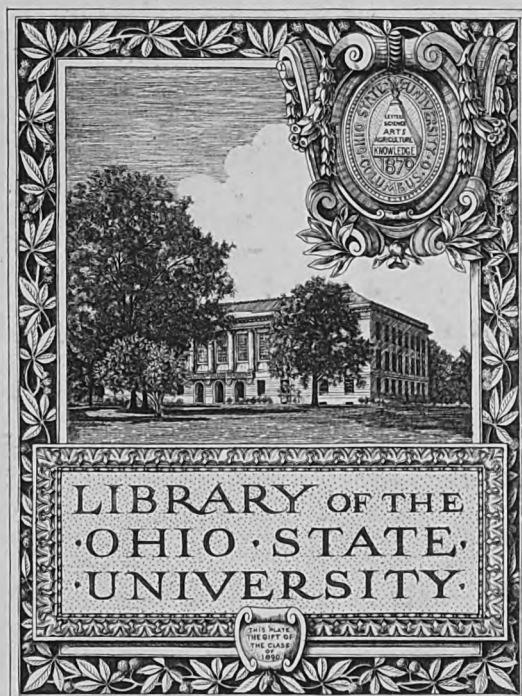
Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>



J. E. French. Gal. 1915.

A. N. Macdonald. '90.

C-2

OHIO STATE
UNIVERSITY
SEP 12 1929
LIBRARY

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 Décembre 1886

Siège social
et Laboratoire central d'Electricité :
14, Rue de Staël
PARIS



Siège administratif
et Ecole Supérieure d'Electricité :
8 à 14, Avenue Pierre-Larousse
MALAKOFF (Seine)

N° 95 (Tome IX)

Juillet 1929

DANS CE NUMÉRO :

Communications techniques

Modèle électrique pour la détermination des courants de court-circuit, M. VAN STAVEREN. — Vérifications récentes de la mécanique ondulatoire, M. M. de BROGLIE. — Le télétype dans les bureaux télégraphiques à faible trafic, M. MERCY.

Rapports annuels de la Section d'Éclairage (2^e partie)

Essais sur les lampes à vapeur de mercure, M. M. LEBLANC. — Lampes à incandescence, M. MAISONNEUVE. — Photométrie, M. JOUAUST. — Optique physiologique, D^r HAAS. — Eclairage des studios, M. CABET. — Enseignes lumineuses, M. FONSEQUE. — Balisage nocturne des itinéraires d'avions, M. ABADIE. — Propagande d'éclairage, M. COHU.

Travaux des Sections

Alternateurs synchrones. — Alternateurs auto-exciteurs. — Electrolyseurs Pechkranz. Extraction électrolytique de l'iode. — Manœuvre des couteaux de sectionnement sur les transformateurs en charge. — Définition de l'unité de fréquence. — Télégraphie à fréquences acoustiques.

Bibliographie

Etienne CHIRON, Editeur
40, Rue de Seine, PARIS

PRIX : 12 Francs

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Société reconnue d'utilité publique par décret du 7 Décembre 1888

SIÈGE SOCIAL :

12 et 14. Rue de Staël, Paris-15°

La Société est présidée alternativement par un Professeur de l'enseignement supérieur et par un Ingénieur ; elle est administrée par un Comité et par un Bureau renouvelables annuellement par tiers.

Elle publie, depuis 1884, un bulletin dont la collection embrasse toute l'histoire de l'électrotechnique et qui contient, outre les comptes rendus des séances publiques et des séances de sections, un écho des Sociétés étrangères.

Elle tient chaque année dix séances publiques où des conférences accompagnées d'expériences sont faites par ses membres les plus qualifiés, et une semaine de discussions où les principales questions à l'ordre du jour sont discutées et mises au point.

Les six sections de son Comité, ouvertes à tous les membres de la Société, étudient les principales questions électrotechniques. Leurs travaux servent de base aux cahiers des charges élaborés par les Groupements syndicaux.

Elle a créé, en 1924, un *Groupe Sud-Est* (Grenoble, Lyon, Saint-Etienne) et un *Groupe Sud-Ouest* (Bordeaux, Toulouse).

Elle organise, pour ses Membres, des visites d'usines, voyages en France et à l'Étranger.

Elle a fondé :

En 1888, le *Laboratoire Central d'Electricité* consacré aux recherches techniques et aux essais industriels, 14, rue de Staël, à Paris.

En 1894, l'*Ecole Supérieure d'Electricité*, 14, rue de Staël, à Paris, qui assure aux ingénieurs, par ses diverses branches, un enseignement électrotechnique supérieur, un enseignement spécialisé de radiotélégraphie et un enseignement spécialisé d'éclairage.

La Société a contribué à la création, en 1925, de la Société pour favoriser le développement du haut enseignement de l'électrotechnique en France. Cette dernière Société a pour objet de contribuer à l'organisation matérielle du haut enseignement scientifique et technique de l'électricité en France, dans les colonies françaises et pays de protectorat, et d'apporter son concours à l'industrie française pour la création et le développement d'un centre de haute culture électrotechnique.

Conditions d'admission : Être présenté par deux parrains membres de la Société ; verser une cotisation annuelle (80 francs pour les Membres individuels, 160 francs pour les Sociétés et Groupements scientifiques et industriels, 40 francs pour les Élèves en cours d'études dans un Établissement supérieur d'enseignement électrotechnique et pendant les trois années qui suivent leur sortie de l'école). Il est réclamé, en outre, 20 francs de frais supplémentaires de correspondance pour les membres résidant à l'Étranger.

Pour les demandes d'admission et tous renseignements, s'adresser au siège social. La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Détermination des courants de court-circuit dans un réseau à l'aide d'un modèle électrique (M. VAN STAVAREN), p. 678. — Les vérifications récentes de la mécanique ondulatoire dans le cas du mouvement des électrons (M. Maurice de BROGLIE), p. 695. — Considérations sur l'emploi de l'appareil télétype dans les Bureaux télégraphiques à faible trafic et résultats d'expériences (M. MERCY), p. 705.

RAPPORTS ANNUELS DE LA 2^e SECTION (1) (Suite) :

Résultats de quelques essais récents sur les lampes à vapeur de mercure (M. Maurice LEBLANC), p. 710. — Lampes à incandescence (M. MAISONNEUVE), p. 717. — Etat actuel de la photométrie (M. JOUAUST), p. 720. — Les progrès de l'optique physiologique (M. le Docteur HAAS), p. 728. — L'éclairage des studios et ses perfectionnements en 1928 (M. CABET), p. 736. — L'industrie des enseignes lumineuses (M. FONSREQUE), p. 747. — Balisage nocturne des itinéraires d'avions (M. ABADIE), p. 749. — Compte-rendu sur la propagande d'éclairage (M. COHU), p. 756.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS.

a) Compte-rendu de la visite de Membres de l'I. E. E. en France au mois de Juin 1919, p. 764.

TRAVAUX DES SECTIONS.

Sommaire, p. 768. — Texte, p. 763.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 789.

IL Y A TRENTÉ ANS, p. 792.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

4^e série, tome IX, Juillet 1929, n° 95.

360662

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS

DETERMINATION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS UN RESEAU A L'AIDE D'UN MODÈLE ELECTRIQUE ⁽¹⁾

par J.-C. VAN STAVEREN.

*Directeur du Bureau Central de l'Association de Directeurs
d'entreprises électriques des Pays-Bas.*

Importance de la détermination des courants de court-circuit. — Calcul du courant de court-circuit stationnaire : court-circuit triphasé ; court-circuits biphasé et monophasé. — Courant de court-circuit instantané triphasé. — Avantages de la détermination expérimentale des courants de court-circuit. — Premières réalisations américaines. — Modèle de l'auteur. — Réalisation du Limbourg néerlandais.

Avant d'aborder la matière de ma conférence, je me fais un plaisir de remercier la Société Française des Electriciens de l'honneur qu'elle m'a fait en m'invitant à vous décrire la manière dont le problème de la détermination des courants de court-circuit a été traité par le Bureau Central de l'Association de directeurs d'entreprises électriques des Pays-Bas, et j'espère pouvoir vous montrer que cette question a été résolue avec un degré d'exactitude suffisant pour les besoins de la pratique.

Importance de la détermination des courants de court-circuit.

Le fait que ce problème est devenu aussi important dans ces derniers temps, provient du développement continu de l'électrification dans tous les pays. A mesure que les réseaux de distribution se sont développés, il a fallu augmenter la puissance des centrales, ce qui a aggravé les dangers qui peuvent résulter d'un court-circuit. Rappelons-nous que ces derniers sont surtout de deux sortes ; il faut distinguer d'une part le courant instantané de court-circuit, qui peut atteindre des valeurs très considérables et dont dépendent les effets électro-dyna-

(1) Conférence faite par M. Van Staveren devant la 4^e Section de la Société française des Electriciens, le 26 avril 1929.

miques sur les machines et les appareils, et d'autre part le courant stationnaire, qui est important surtout au point de vue de l'énergie thermique développée.

En ce qui concerne le courant instantané, beaucoup d'entreprises ont déjà appris, à leurs dépens, que les forces électro-dynamiques qui se produisent peuvent atteindre des valeurs étonnantes et suffisamment grandes non seulement pour faire éclater des câbles souterrains, mais aussi pour détruire des bobines de génératrices ou de transformateurs, et même pour tordre les barres omnibus de façon à en faire un chaos méconnaissable. Si les effets de ces à-coups mécaniques peuvent donc être désastreux, je voudrais pourtant, pour ne pas trop peindre en noir, rappeler un cas dans lequel ces forces ont réussi à préserver une grande centrale néerlandaise d'un sérieux danger. Il s'agissait d'un court-circuit dans l'une des principales lignes de câbles partant de la centrale, et dans laquelle l'interrupteur à huile n'avait pas fonctionné, ce qui aurait eu des conséquences néfastes si les sectionneurs, qui n'étaient pas verrouillés en ce moment, n'avaient pas coupé le courant. Toutefois, avec ce cas, la liste des bonnes œuvres des courants de court-circuit est épuisée, du moins pour autant que je le sache ; aussi, actuellement, on s'efforce de choisir les qualités des machines d'une manière appropriée et d'employer des bobines de self, afin de limiter autant que possible les forces en question.

Quant aux courants stationnaires de court-circuit, le danger est surtout d'une autre nature, et ce sont ici les effets thermiques qui menacent d'incendier les génératrices et les transformateurs ou de détruire des réseaux de câbles coûteux. Ainsi, les nombreux cas d'explosions d'interrupteurs dans l'huile, qui ont détérioré souvent aussi les bâtiments dans lesquels ces appareils étaient installés, peuvent être attribués généralement aux effets des courts-circuits stationnaires.

Il est donc évident que ces dangers ont attiré la plus grande attention en vue de prévenir de telles catastrophes. Or, pour bien pouvoir dimensionner tout l'appareillage d'une manière suffisante et pour juger des méthodes de protection nécessaires, il s'agit avant tout de pouvoir déterminer d'une manière sûre et rapide l'importance des courants de court-circuit auxquels on devra s'attendre. C'est uniquement lorsqu'on est bien documenté à ce sujet, que l'on peut veiller à un ajustage approprié des dispositifs de protection, à un choix judicieux du rapport de transformation et du type des transformateurs d'intensité, au choix des interrupteurs dans l'huile, etc.

Calcul du courant de court-circuit stationnaire.

Or, le problème de court-circuit n'est, en principe, pas autre chose qu'une application de la loi d'Ohm pour les courants alternatifs. Il s'agit seulement de déterminer la tension qui agit dans le circuit, et l'impédance sur laquelle elle est branchée. On voit immédiatement

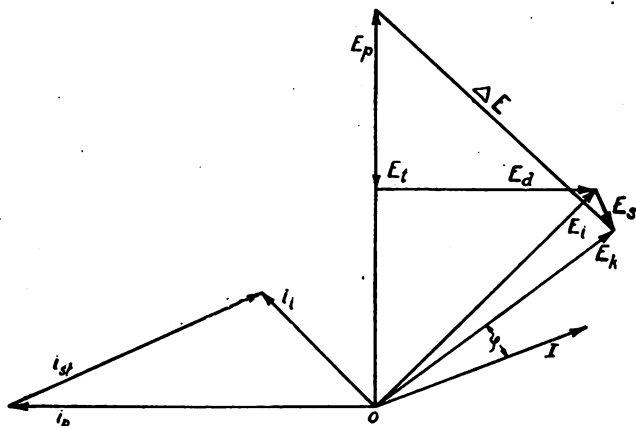


Fig. 1. — Diagramme de vecteurs d'une machine synchrone.

que les réponses à ces questions seront différentes suivant qu'il s'agira des courants instantanés ou stationnaires, et de court-circuits monophasés, biphasés ou triphasés, tandis qu'en outre l'état de charge existant avant le court-circuit exercera également une influence sur les résultats. Le cas le plus simple est celui du courant stationnaire pour un court-circuit triphasé, car alors l'intensité est relativement facile à déterminer à l'aide du diagramme de vecteurs des machines synchrones, qui est représenté dans la figure 1.

Court-circuit triphasé.

Dans cette figure, le vecteur E_k représente la tension aux bornes de la génératrice, tandis que le courant I du stator est décalé d'un angle φ et est en retard par rapport à E_k . La résistance ohmique du stator et la chute de tension correspondante peuvent être négligées, mais il faut tenir compte de la chute de tension E_s , provoquée par la réactance de dispersion, et dont le vecteur est perpendiculaire à I . La

résultante des deux tensions E_k et E_s est la force électromotrice E_i , qui est réellement induite dans le stator. A l'aide de la caractéristique de marche à vide, on peut déterminer la valeur correspondante i_i du courant d'excitation dans le rotor, qui serait nécessaire s'il n'y avait pas de réaction du stator. Le courant i_i est un courant continu, mais par suite du mouvement synchrone du rotor, ce courant peut être représenté également dans le diagramme des vecteurs, où il est en avance de 90° par rapport à la tension E_i . Toutefois, il ne suffit pas d'alimenter l'enroulement d'excitation avec ce courant, car il faut, en outre, compenser la réaction magnétique du courant I du stator. En effet, le stator immobile et le rotor tournant forment ensemble une sorte de transformateur; le courant du stator, réduit à un courant de rotor suivant le rapport de transformation de la génératrice, est représenté dans le diagramme par la valeur i_{st} . On trouve alors, comme résultante des vecteurs i_i et i_{st} , le courant i_p qui circule réellement dans l'enroulement du rotor. A l'aide de la caractéristique de la marche à vide, on peut déterminer la tension fictive E_p qui serait induite s'il n'y avait pas de courant dans le stator. En réalité, le courant I provoque une réaction magnétique, de sorte qu'on n'obtient que la force électromotrice E_i . Outre E_s , il y a donc encore une autre chute de tension, savoir la différence vectorielle entre E_p et E_i , qui peut être décomposée en une tension E_l en opposition avec E_p , et une autre tension E_d décalée de 90° . La chute de tension totale qui a lieu dans la machine par suite du courant I est représentée par ΔE , c'est-à-dire par la différence vectorielle entre E_p et E_k ; en divisant cette chute de tension par le courant I du stator, on trouve l'impédance synchrone, qui sera désignée dans la suite par Z_s .

Il résulte de la construction du diagramme que l'impédance Z_s n'a pas une valeur constante, mais qu'elle dépend de l'état de charge de la machine. En service normal, elle diminue lorsque la charge augmente, et en cas de court-circuit elle aura une toute autre valeur. Suivant que le courant de court-circuit sera plus ou moins intense, l'impédance synchrone variera également.

Ces fluctuations ne sont pourtant pas bien importantes, et la comparaison des deux courbes de la figure 2 montre que l'on ne fait pas une grande faute en supposant, pour tous les cas de court-circuit, une même valeur de l'impédance synchrone. En effet, cette figure représente le courant de court-circuit stationnaire et triphasé en fonction de l'impédance du circuit extérieur, pour l'exemple d'une centrale de 75 000 kW, à pleine charge, avec $\cos \varphi = 0,8$, sous une tension de

11 000 V, et avec un circuit extérieur de 6 câbles souterrains de $3 \times 120 \text{ mm}^2$ chacun. La courbe en trait plein donne les valeurs exactes, calculées à l'aide du diagramme de vecteurs, tandis que la courbe pointillée a été déterminée à l'aide d'une valeur constante de l'impédance synchrone de court-circuit. Notre Bureau Central a publié dernièrement une méthode simple, et suivant laquelle le courant stationnaire de court-circuit peut être déterminé à l'aide du diagramme de vecteurs et de la caractéristique de marche à vide, grâce à l'emploi d'un système d'axes obliques de coordonnées (1).

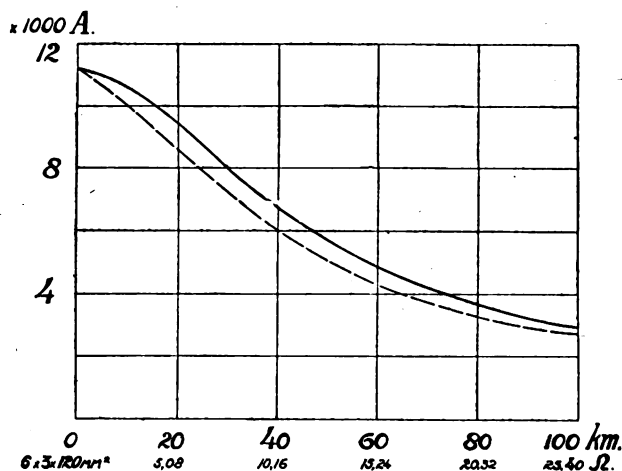


Fig. 2. — Courant stationnaire de court-circuit triphasé, calculé suivant deux méthodes différentes.

Pour le calcul de la courbe pointillée de la figure 2, on a choisi, pour l'impédance synchrone, la valeur que l'on trouve en cas de court-circuit aux bornes de la machine ; par suite, les deux courbes donnent la même intensité pour ce cas, c'est-à-dire que leur point d'intersection se trouve sur l'axe des ordonnées. Étant donné que pendant le court-circuit le courant d'excitation i_p et la tension fictive correspondante E_p restent invariables, la courbe pointillée de la figure 2 a été déterminée simplement par l'application de la loi d'Ohm pour les courants alternatifs, en divisant la tension E_p par la somme vectorielle de l'impédance synchrone Z_s de la génératrice et de l'impédance extérieure Z_e de la partie du réseau soumise au court-circuit. Un examen de la figure 2 montre que la différence entre les deux courbes ne dépasse

(1) Cette publication est mise à la disposition des personnes intéressées par le Bureau Central de l'Association de Directeurs d'Entreprises Électriques des Pays-Bas, à Arnhem, Utrechtscheweg 34.

pas les limites admissibles, savoir celles de l'exactitude avec laquelle on peut déterminer les données pour l'étude de notre problème. Il est vrai qu'on pourrait choisir pour l'impédance synchrone de court-circuit une autre valeur, savoir celle correspondant à une faible impédance extérieure, et qu'ainsi on pourrait obtenir encore une meilleure concordance entre les deux courbes; mais, dans ce cas, la méthode approximative donnerait, pour le cas de court-circuit aux bornes, une intensité supérieure à la valeur réelle. Or, la plus grande valeur du courant de court-circuit est précisément la plus importante, de sorte qu'il semble préférable d'obtenir la meilleure concordance pour le court-circuit aux bornes, même au prix d'une divergence un peu plus grande pour les autres points des courbes.

Pour l'application pratique de cette méthode, il ne reste donc plus qu'à décider comment on déterminera les valeurs de E_p , de Z_s et de l'impédance extérieure Z_c . En ce qui concerne E_p , il sera désirable de se baser sur l'état de choses le plus défavorable qui puisse se présenter en service, c'est-à-dire sur l'état de pleine charge des machines avec le déphasage le plus grand qui se présente en pratique. Lorsque plusieurs machines marchent en parallèle, il faudra choisir pour E_p une valeur moyenne, ce qui n'aura aucune difficulté et ne causera pas d'inexactitude notable. Comme impédance synchrone de court-circuit, on prendra la valeur résultant de la connexion en parallèle des impédances synchrones des différentes machines.

L'impédance extérieure Z_c dépend des propriétés de la partie du réseau qui est connectée entre la centrale et l'endroit du court-circuit. Afin qu'on puisse calculer Z_c , il faudra donc remplacer cette partie par un seul conducteur, à l'aide de la méthode de transfiguration, qui nécessite une longue besogne, surtout lorsqu'il s'agit d'un réseau de câbles, de lignes aériennes et de transformateurs connectés en un grand nombre de boucles. Heureusement, on peut généralement négliger la capacité des conducteurs, même dans les réseaux à câbles souterrains, étant donné qu'elle n'aurait qu'une faible influence sur la valeur des courants stationnaires de court-circuit. En outre, si l'on néglige la capacité, cette circonstance améliore la sécurité du calcul, attendu qu'on trouve alors des intensités supérieures aux valeurs réelles; cette circonstance donne donc une certaine compensation pour l'inexactitude due à l'emploi de l'impédance synchrone (courbe pointillée de la fig. 2).

Court-circuits biphasé et monophasé.

Les considérations ci-dessus se rapportent toutes aux courts-circuits triphasés, de sorte qu'il faut encore examiner les modifications nécessaires en cas de court-circuits biphasés ou monophasés. S'il se produit un court-circuit entre deux phases, il faudra remplacer la tension E_p par la somme vectorielle des deux tensions induites dans les deux phases, c'est-à-dire par $\sqrt{3}E_p$. Quant à l'impédance synchrone, il faudra, ici aussi, la déterminer de manière à trouver aussi exactement que possible le courant de court-circuit aux bornes. Comme un tel cas de charge non symétrique ne se prête pas bien à l'examen mathématique, il vaudra mieux se baser sur les résultats trouvés en pratique, et suivant lesquels le courant de court-circuit stationnaire et biphasé, aux bornes d'une génératrice, est égal à environ 1,5 fois la valeur du courant triphasé correspondant.

La tension active et le courant aux bornes étant déterminés de la sorte, l'impédance synchrone sera égale au quotient de ces deux grandeurs. En court-circuit monophasé, qui peut se produire lorsque le neutre est mis à la terre, la tension sera de nouveau E_p , tandis que le courant de court-circuit s'élèvera en moyenne à environ le double du courant triphasé correspondant. Ici aussi, l'impédance synchrone sera déterminée comme quotient de la tension et du courant. Enfin, il faut modifier également la valeur de l'impédance extérieure Z_e . En cas d'un court-circuit biphasé dans des réseaux de câbles ou de lignes aériennes, cette tâche n'est pas difficile, étant donné que les valeurs des résistances ohmiques et des inductances peuvent être facilement calculées, ou bien déduites de tableaux ou de mesures. En court-circuit monophasé, au contraire, la chose n'est plus aussi simple. En cas de lignes aériennes avec conducteurs de terre et avec mise à la terre du neutre, il y a encore une possibilité de calcul, mais pour les réseaux souterrains, un nouveau facteur entre en ligne de compte, savoir l'influence de l'armure en fer. Il est difficile de déterminer avec certitude l'importance de cette influence, et de trouver quelle partie du courant retournera à la génératrice par la terre et quelle autre partie y retournera par les gaines de plomb. Heureusement, par suite de ces influences, les courants de court-circuit stationnaire monophasé seront moindres que les courants biphasés ou triphasés, du moins à une certaine distance de la centrale, de sorte que la détermination de leurs valeurs exactes n'est pas si importante.

En résumé, les courants stationnaires de court circuit biphasé ou triphasé peuvent donc être calculés suivant la même méthode et avec une approximation suffisante à l'aide de la tension E_p , de l'impédance synchrone pour le cas de court-circuit en question, et de l'impédance du réseau, tandis que le calcul des courants de court-circuit monophasé présente des difficultés en ce qui concerne la détermination des impédances du réseau.

Courant de court-circuit instantané triphasé.

Après avoir traité ainsi les courants stationnaires, nous devons passer à l'examen des phénomènes qui se présentent au premier instant du court-circuit. Une simple considération physique nous montre que, dans ce cas, deux influences se feront ressentir. En général, si une certaine tension fait circuler un courant dans un circuit composé de résistances et d'inductances, et qu'une partie de ces résistances et de ces inductances est mise en court-circuit, on n'obtiendra pas immédiatement le nouvel état de courant stationnaire correspondant, mais il se produira des phénomènes transitoires caractérisés surtout par un courant continu supplémentaire, qui sera amorti plus ou moins vite suivant la valeur de la résistance ohmique du circuit. L'amplitude de ce courant peut varier entre zéro et une valeur maximum, suivant le moment où le court-circuit a lieu. Lors de chaque changement de la charge d'une génératrice synchrone, il se produira donc également un tel courant continu, qui sera particulièrement fort en cas d'un court-circuit.

Une seconde cause qui provoque, au premier instant d'un court-circuit, un état de choses spécial dans la génératrice, est la suivante :

Dès que le courant du stator augmentera, il induira dans le rotor un courant supplémentaire qui tendra à maintenir le champ magnétique existant, et donc aussi la force électromotrice E_i . La valeur maximum du courant alternatif dans l'enroulement du stator, sera alors égale au quotient de la force électromotrice E_i (voir fig. 1) par la réactance de dispersion de la machine. Outre ce courant alternatif, il y a encore la composante de courant continu mentionnée ci-dessus, et dont la valeur dépend non seulement du moment du court-circuit, mais surtout de l'impédance du circuit considéré.

La figure 3 montre le courant instantané de court-circuit pour le cas le plus défavorable, qui se présente lorsque le court-circuit a lieu au

moment de l'intensité maximum de la composante de courant continu. Dans cette figure, la courbe A représente le courant stationnaire de court-circuit ; B est le courant continu supplémentaire, et C la composante alternative supplémentaire, de sorte que le courant résultant est représenté par la courbe R.

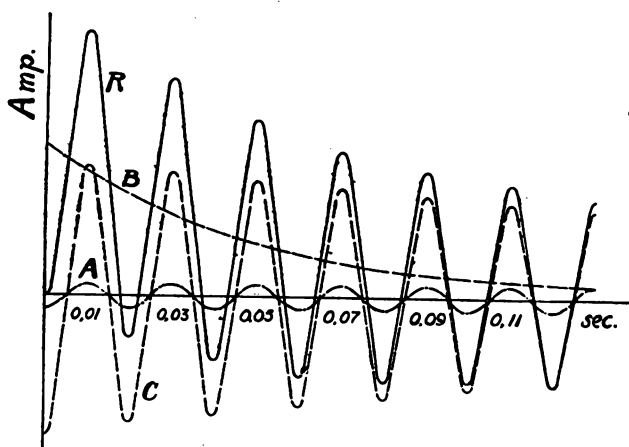


Fig. 3. — Courbes composantes et courbe résultante du courant instantané de court-circuit.

En ce qui concerne le calcul du courant instantané, on peut de nouveau appliquer la loi d'Ohm pour la composante alternative. Il s'agit seulement de déterminer la tension active et les impédances des génératrices et du réseau. L'impédance du réseau est naturellement la même que pour le court-circuit stationnaire. Par contre, l'impédance de la génératrice a maintenant une tout autre valeur, qui, comme il a été dit plus haut, est donnée par la réactance de dispersion. Pour les turbo-génératrices, la dispersion du stator et du rotor est sensiblement égale à celle du stator seul. Comme tension active, il faut considérer ici la valeur maximum $\sqrt{2}E_r$, qui, du reste, est à peu près égale à $\sqrt{2}E_k$. Si l'on divise cette tension par la somme vectorielle de la réactance de dispersion et de l'impédance du réseau, on trouve ainsi la composante alternative du courant instantané de court-circuit. Quant au calcul de la composante de courant continu, il est plus compliqué. Pour un court-circuit aux bornes d'une génératrice moderne, la valeur maximum de ce courant peut atteindre à peu près le même ordre de grandeur que la composante alternative. Dans ce cas, les deux composantes ayant le même signe après une demi-période, le maximum du

courant total sera à peu près égal au double de la composante alternative (voir fig. 3). Par contre, si le court-circuit se produit à une certaine distance de la centrale, la résistance ohmique intercalée produira un tel effet amortissant sur la composante de courant continu, du moins dans les câbles souterrains, que cette composante aura à peu près disparu après une demi-période. La valeur trouvée pour la composante alternative devra donc être multipliée par un facteur dont la valeur sera comprise entre 1 et 2. Pour un court-circuit aux bornes, ce facteur sera d'environ 1,8, par suite de l'influence de la résistance ohmique du stator, mais dès que la résistance entre la centrale et l'endroit du court-circuit ne sera pas très petite, ce facteur pourra être posé égal à 1.

Court-circuits biphasés et monophasés.

Les considérations ci-dessus se rapportent au courant momentané de court-circuit triphasé, mais on peut aussi les adapter aux cas de court-circuits biphasé et monophasé, d'une manière analogue que pour les courants stationnaires. En court-circuit monophasé, on éprouve de nouveau la même difficulté au sujet de l'impédance du réseau, mais comme le courant instantané ne joue un rôle important que pour les centrales et les sous-stations importantes, cette difficulté est encore moins sérieuse que pour les courants stationnaires, de sorte qu'il ne sera pas nécessaire d'approfondir davantage cette question. Enfin, il faut encore noter qu'il se produit un courant de décharge du réseau, qui ne joue généralement pas un rôle important et dont il ne sera donc pas tenu compte dans la suite.

Avantages de la détermination expérimentale.

A l'aide de ces considérations sur le calcul des courants stationnaires et instantanés en court-circuit monophasé, biphasé et triphasé, le problème est résolu en principe et l'on pourrait se mettre à l'œuvre; mais c'est alors seulement que surgissent les difficultés pratiques. En effet, il y a beaucoup de réseaux contenant tant de boucles et des connexions si nombreuses, qu'il serait difficile ou même impossible de les transfigurer, du moins avec une approximation suffisante; en outre, ces réseaux peuvent être alimentés, en divers endroits, par plusieurs centrales, suivant l'heure de la journée ou d'autres circonstances. De

plus, chaque modification dans les centrales ou dans les réseaux oblige à recommencer les calculs, de sorte qu'il serait très utile si l'on pouvait déterminer les différentes sortes de courants de court-circuit d'une manière plus simple, et pourtant suffisamment exacte pour les besoins de la pratique. C'est ainsi que se présente la possibilité de déterminer expérimentalement ces courants à l'aide d'un modèle électrique du réseau. En effet, si l'on peut représenter, dans un tel modèle, les impédances du réseau et des machines, ainsi que les différentes tensions qui entrent en ligne de compte, il sera possible de lire directement sur un ampèremètre, l'intensité de court-circuit, réduite à une échelle appropriée.

Premières réalisations américaines.

Les premières tentatives de ce genre, qui ont été faites, entre autres, aux Etats-Unis d'Amérique, étaient basées sur l'emploi de courant continu. Elles se rapportaient à des réseaux aériens, dans lesquels la résistance ohmique peut être négligée par rapport à la réactance. Par conséquent, les courants réactifs étaient tous en concordance de phase, et l'emploi d'un modèle à courant continu était donc suffisamment exact. Les réactances de chaque ligne, de chaque transformateur et de chaque génératrice étaient représentées, à une certaine échelle, par des résistances ohmiques, et celles-ci étaient connectées entre elles conformément à l'exécution réelle du réseau. On insérait ensuite une tension de courant continu entre les canalisations d'aller et de retour, puis on connectait celles-ci par un court-circuit artificiel à l'endroit considéré. Le courant de ce court-circuit traversait un ampèremètre et pouvait donc être lu directement. De cette manière, le courant de court-circuit pouvait facilement être déterminé pour chaque point du réseau.

Cette méthode est relativement simple, mais elle ne donne pas toujours une bonne approximation. En effet, si le réseau contient une quantité appréciable de câbles souterrains, il n'est plus admissible d'en négliger les résistances ohmiques par rapport aux réactances. On est donc obligé de tenir compte de ces deux influences, et par suite d'employer un modèle électrique pour courant alternatif.

Modèle de l'auteur.

La question de projeter un tel modèle a été posée, il y a quelques années, par M. BELLAR SPRUYT, directeur du service d'électricité du Limbourg Néerlandais, et elle a été résolue par notre Bureau.

Le modèle en question est basé sur le schéma des connexions indiqué dans la figure 4, et qui correspond complètement au réseau réel. Toutes les parties de celui-ci, comme les câbles souterrains, les lignes aériennes, les génératrices, transformateurs, bobines de self, etc., sont représentées chacune par une impédance, tandis que la tension appliquée peut être réglée à volonté.

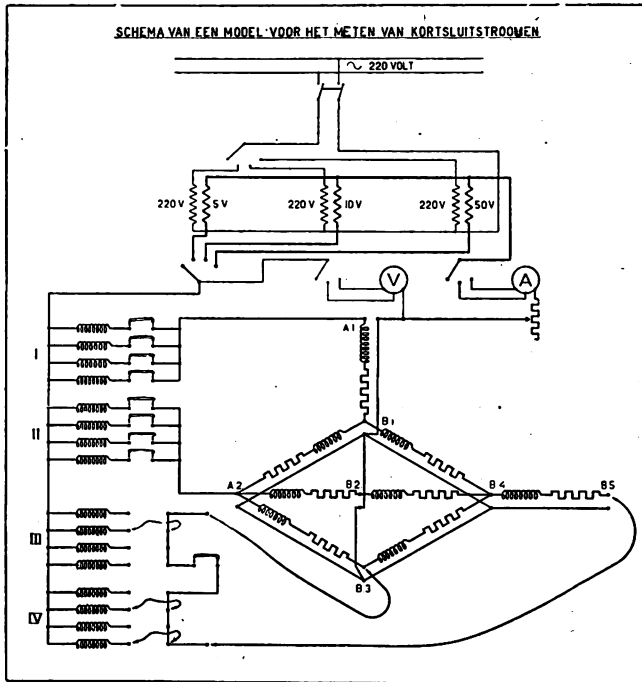


Fig. 4. — Schéma de connexions du modèle pour la détermination expérimentale des courants de court-circuit.

Pour ne pas rendre le modèle trop compliqué, les impédances monophasées remplaçant de toutes les parties nommées du réseau ont été choisies égales aux impédances triphasées des installations réelles. De cette manière, chaque partie du réseau est toujours représentée par une seule et même impédance, tandis qu'on peut alimenter le système par une tension monophasée. Une exception à cette règle ne se présente que pour les génératrices, étant donné que le rapport entre leurs impédances et celles du réseau varie suivant qu'il s'agit du courant instantané ou stationnaire, en court-circuit monophasé, biphasé ou triphasé. Dans chacun de ces six cas, il faut aussi considérer une autre valeur de la tension active, en tenant compte également de ce que le réseau est toujours représenté par les mêmes impédances. Evidemment,

les tensions réelles, et par conséquent aussi les courants de court-circuit, seront réduites dans un rapport approprié, par exemple de 1 : 1000 ou davantage encore. Les tensions nécessaires pour le fonctionnement du modèle sont fournies par un transformateur muni d'une résistance en série et réglable. Pour chaque point de jonction important (A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , etc. dans la fig. 4), les impédances des lignes qui y aboutissent sont connectées à l'une des deux gaines d'une boîte de contact à fiche, l'autre gaine étant connectée partout à un même conducteur de retour. On connecte ensuite les deux conducteurs de ce réseau à la tension d'alimentation, en intercalant les impédances qui représentent les centrales (voir les groupes I et II), ainsi qu'un ampèremètre. Le circuit ainsi obtenu est encore ouvert, mais on peut le fermer à volonté dans un des points de jonction mentionnés, en connectant les deux gaines de la boîte à contact au moyen d'un contact à fiche. Il se produit alors le courant de court-circuit à l'endroit considéré, et réduit dans la même proportion que la tension d'alimentation.

Réalisation du Limbourg néerlandais.

L'exécution pratique d'un tel modèle ne présente aucune difficulté. La figure 5 montre le modèle effectué pour le service d'électricité du Limbourg Néerlandais, comme il a été construit sous la direction de M. KORTLANDT, sous directeur de cette Société. Le panneau central représente la carte de la province en question, avec les centrales et les points de consommation principaux, tandis que les panneaux latéraux sont réservés pour les interrupteurs nécessaires à l'établissement des connexions et pour les instruments de mesure (ampèremètre et voltmètre).

L'impédance de chaque ligne et de chaque machine est représentée dans le modèle électrique par une bobine de self, qui, pour les lignes, est connectée en série avec une résistance ohmique. Ces bobines sont munies de noyaux en fer, afin de pouvoir obtenir les inductances nécessaires sans que les dimensions des bobines ne deviennent trop grandes. D'autre part, il faut éviter que la réactance ne varie trop fort avec la saturation magnétique; dans ce but, on a choisi des noyaux en fer doux et ayant un entrefer de quelques millimètres. Grâce à ce mode d'exécution, l'impédance ne variera que de quelques pour cent, même lors des plus grandes fluctuations du courant. Les résistances ohmiques sont constituées par des bobines de fil de manganine. Il est vrai que ces bobines de résistance ont aussi une certaine réactance, et

qu'en outre, les bobines de self ont une certaine résistance, mais on en a tenu compte en considérant l'ensemble de ces deux appareils comme un seul et même tout et en les étalonnant ensemble, de manière qu'ils constituent l'impédance voulue. Ces deux appareils sont représentés dans la figure 6.

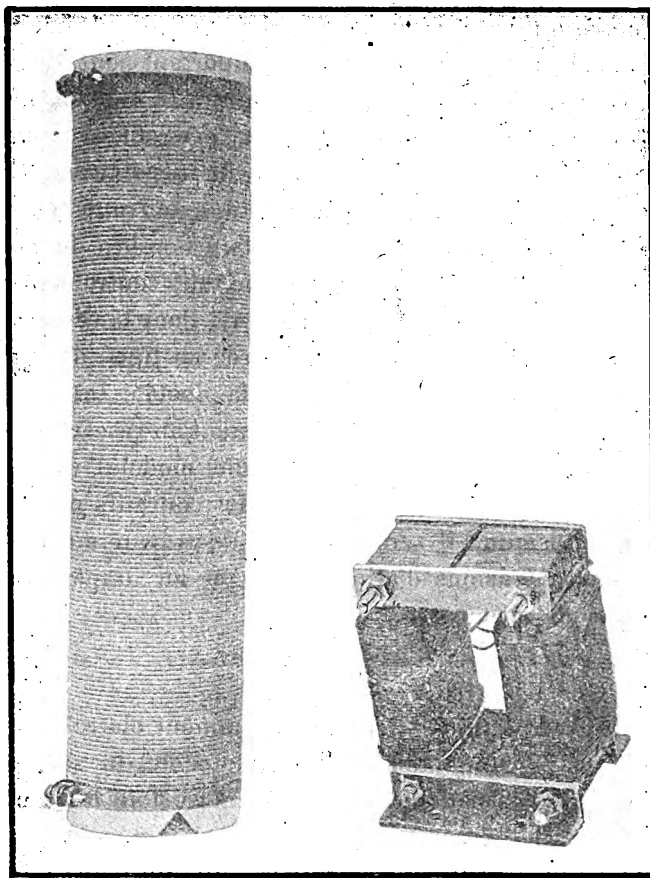


Fig. 6. — Résistance ohmique et bobine de self, représentant ensemble une des impédances du réseau.

Comme chaque centrale peut être considérée comme un seul et même tout, il sera recommandable de la représenter ainsi, et d'exécuter, à cet effet, une série de bobines propres à représenter chaque puissance voulue. On pourra leur donner les impédances correspondant à celles des machines réelles ; mais, d'autre part, il est possible, aussi de représenter de la sorte des unités de 1000 kW, de 2000 kW, etc., lesquelles pourront être combinées à volonté, de la même manière

que cela se fait pour les boîtes de poids. Ainsi, il sera facile de tenir compte des agrandissements ultérieurs des centrales. Les bobines de self et les résistances mentionnées sont disposées à l'arrière du modèle, tandis que le transformateur nécessaire est placé dans l'une des armoires qui se trouvent au-dessous des panneaux latéraux.

Il résulte de ce qui précède que, pour chaque genre de court-circuit, le courant dans chaque point de jonction important peut être lu directement à une certaine échelle sur l'ampèremètre du modèle. Les agrandissements du réseau ou des centrales nécessitent uniquement l'adjonction de quelques bobines de self et de résistances. En outre, on peut déterminer facilement l'influence d'une nouvelle centrale connectée au réseau. A cet effet, il y a un certain nombre de bobines de réserve qui peuvent servir à représenter une telle centrale supplémentaire (voir les groupes III et IV dans la fig. 4). Pour le réseau du Limbourg Néerlandais, cette possibilité est entrée en ligne de compte par suite de la connexion avec la centrale de la Société Intercommunale Belge à Bressoux, qui a été raccordée également au réseau en question. Enfin, pour pouvoir mesurer avec un même modèle, d'une part les courants importants et, d'autre part aussi, les courants moindres avec une exactitude suffisante, il sera désirable de prévoir un transformateur pour plusieurs tensions d'alimentation et un ampèremètre avec plusieurs portées de mesure.

J'espère vous avoir donné une idée suffisamment claire des considérations théoriques sur lesquelles est basé le modèle du service d'électricité du Limbourg Néerlandais, et de la manière dont il a été exécuté. Le service d'électricité du Limbourg Néerlandais a contrôlé l'exactitude du modèle, en exécutant, pendant la nuit, un court-circuit artificiel dans son réseau. Le courant de court-circuit stationnaire trouvé ainsi, était un peu moindre que suivant le modèle, ce qui tient à ce que les machines n'avaient pas pu être excitées avec le courant d'excitation de pleine charge.

La grande importance pratique du modèle a déjà été prouvée par l'expérience d'une manière très significative. En effet, une des sous-stations du réseau du Limbourg Néerlandais contenait des interrupteurs dans l'huile dimensionnés, dans le temps, pour une puissance relativement faible. Or, les puissances transmises par le réseau ayant considérablement augmenté depuis, la direction du Service d'électricité



Fig. 5. — Photographie du modèle pour la détermination expérimentale des courants de court-circuit.

douta si les interrupteurs en question étaient encore suffisants pour le nouvel état de service. En effet, les mesures faites à l'aide du modèle prouvèrent qu'on devait s'attendre à des courants de court-circuit beaucoup trop élevés pour ces appareils. C'est pourquoi, la direction de l'entreprise susnommée fit installer une nouvelle sous-station avec des interrupteurs capables de supporter les intensités trouvées. L'expérience montra qu'en agissant ainsi, elle avait fait preuve d'une sage prévoyance, car la nouvelle station était à peine installée lorsque les anciens interrupteurs encore en service subirent un court-circuit qui les fit éclater. L'emploi du modèle a donc servi à l'installation, en temps utile, des appareils de réserve nécessaires.

Les frais de construction du modèle, réduits à l'index économique d'avant-guerre, ont été d'environ 6000 francs-or, ce qui n'est certes pas une quantité négligeable. C'est dans ce but que je me propose d'élaborer une sorte de modèle universel, à l'aide duquel on pourra imiter n'importe quel réseau, et qui pourra ensuite être démonté après l'exécution des mesures nécessaires. Dans ce but, il faudra combiner des résistances et des réactances à la manière des boîtes de poids, et les connecter entre elles à l'aide de barres omnibus et de conducteurs flexibles, de façon à imiter exactement le réseau en question.

LES VÉRIFICATIONS RÉCENTES DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE DANS LE CAS DU MOUVEMENT DES ÉLECTRONS ⁽¹⁾

par M. MAURICE DE BROGLIE.

Rappel de la théorie. — Expériences de Davisson et Germer, de G.-P. Thomson, de Rupp, de Ponte. Résumé.

Les travaux des physiciens ont abouti, un peu avant la fin du siècle dernier, à la notion d'une quantité élémentaire d'électricité désignée sous le nom d'électron et l'on sait quel rôle fondamental ces électrons jouent dans toutes les parties de la Physique moderne. On a ainsi été amené à envisager le mouvement que pouvaient prendre de petits corpuscules dans un champ de forces. Le problème se définira, au point de vue mécanique, en attribuant à tous les électrons une masse m parfaitement bien déterminée (dont la valeur est actuellement mesurée par $8,999 \cdot 10^{-28}$ gramme ce qui équivaut à la fraction $1/1850$ de la masse d'un atome d'hydrogène) et en leur appliquant des forces convenables conformément aux lois de la dynamique. Les forces auxquelles ils peuvent être soumis sont, d'abord, la force électrique proportionnelle à la charge e de l'électron et à l'intensité du champ électrique, puis une force supplémentaire si l'électron est en mouvement dans un champ magnétique, conformément aux idées longtemps classiques de la théorie de Lorentz. C'est en se basant sur le mouvement des électrons observé dans ces conditions et en l'interprétant au moyen de la dynamique ordinaire, que la masse d'inertie m de l'électron a été déterminée et naturellement regardée au début comme constante. Cependant, un peu plus tard, la théorie de la relativité a conduit à envisager un phénomène nouveau pour les corps en mouvement très rapide ; la masse ne serait plus invariable comme le voulait l'ancienne dynamique, elle croîtrait avec la vitesse v conformément à la formule d'Einstein :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(1) Communication présentée le 10 Mai 1929 à la Séance organisée en commun par la Société Française des Electriciens et par la Société des Ingénieurs civils de France.

L'expérience est venue confirmer la prévision d'Einstein; vous savez que les méthodes classiques de déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ électrique et dans un champ magnétique permettent, au moyen de deux équations, d'obtenir les valeurs de $\frac{e}{m}$ et de v ; on avait donc le moyen, en admettant la constance de c , de dresser une table des valeurs de m en fonction de v et de vérifier la formule d'Einstein, c'est ce qu'en particulier, les belles expériences de M. GUYE ont remarquablement confirmé. Une autre vérification, portant cette fois sur des vitesses extrêmement grandes, peut se trouver dans la concordance des fréquences de rayons gamma mesurés, d'une part, directement par diffraction sur des réseaux cristallins et, d'autre part, par la déviation magnétique des photoélectrons dus à ces mêmes rayons. On égale, en effet, à l'énergie cinétique de ces photoélectrons dont l'expression découle des théories relativistes, le produit de la fréquence des rayons excitateurs par la constante universelle de Planck.

Jusqu'à ces toutes dernières années, il semblait donc parfaitement permis d'appliquer aux électrons les théories de la dynamique classique avec les amendements, négligeables pour les faibles vitesses, que la variation relativiste de la masse venait y apporter et les expériences sur les corpuscules électroniques, loin d'infirmer la vieille mécanique, pouvaient passer pour en être une confirmation satisfaisante et une extension nouvelle.

Nous allons voir que des considérations d'un caractère tout nouveau ont amené à tenter, sur les électrons en mouvement, des expériences d'un genre particulier qui ont eu pour résultat de modifier profondément cette conclusion.

Il sortirait du cadre de cette conférence de donner ici un exposé, même très rapide, des nouvelles théories qui se groupent sous le nom général de mécanique ondulatoire, mais je voudrais vous en indiquer quelques idées directrices pour aboutir à la formule de longueur d'onde que mon frère, Louis de BROGLIE, a énoncée pour la première fois, en 1924, dans sa thèse de doctorat et dont l'expérience a récemment confirmé l'exactitude.

Il se trouve qu'en mécanique et en optique il existe des principes généraux qui condensent, pour ainsi dire, la doctrine tout entière; en mécanique, par exemple, le principe de Maupertuis s'énonce ⁽¹⁾ en disant

(1) Avec les restrictions que l'on trouvera dans les traités spéciaux.

que la trajectoire effectivement suivie par un corps est celle pour laquelle la somme du produit des vitesses par les éléments de chemin parcouru est minima; c'est la forme sous laquelle Euler a mis l'énoncé vague que Maupertuis avait désigné sous le nom de principe de moindre action.

On écrira donc :

$$\int_A^B v ds = \text{Minimum.}$$

D'autre part, en optique, il existe un principe général dû à Fermat exprimant que la lumière suit le chemin pour lequel le temps de propagation est minimum. Puisque le temps est représenté par le chemin divisé par la vitesse, le principe de Fermat s'exprimera par

$$\int_A^B \frac{ds}{u} = \text{Minimum.}$$

Dans l'expression du principe de Maupertuis, v est la vitesse mécanique d'un point matériel en mouvement ; dans celle du principe de Fermat, u est la vitesse de propagation d'une onde dans l'espace, mais u figure au dénominateur tandis que v était au numérateur (fait dont Maupertuis s'était du reste rendu compte). On voit donc que si l'on pouvait associer au mouvement d'un point matériel, qui se meut avec une vitesse v , une onde se propageant avec une vitesse u telle que

$$v = \frac{\text{constante}}{u}$$

les expressions des deux principes deviendraient tout à fait analogues.

Je vous rappellerai, d'une part que la théorie de la relativité a conduit Einstein à rattacher à l'existence de chaque masse matérielle m une énergie égale à mc^2 où c est la vitesse de la lumière et, d'autre part, que la théorie des quanta a conduit Planck à considérer, à côté de chaque radiation de longueur d'onde λ et de fréquence $\nu = \frac{c}{\lambda}$, un quantum d'énergie exprimé par :

$$h\nu$$

où ν est la fréquence et h une constante universelle.

On peut alors penser à rapprocher ces deux expressions d'énergie et à attribuer à chaque point matériel ayant une masse m , une fréquence ν définie par

$$h\nu = mc^2 \quad \nu = \frac{mc^2}{h}.$$

Il s'agit là d'un point matériel, immobile si l'on veut, de sorte que la fréquence ν est quelque chose de tout à fait virtuel et fictif.

Or, on peut montrer, toujours dans le cadre de la relativité, que si une oscillation est liée à un système qui se meut avec une vitesse v par rapport à un système fixe, elle se présentera, par rapport au système fixe, comme une onde spatiale douée d'une vitesse u de propagation telle que :

$$u = \frac{c^2}{v}$$

c étant la vitesse de la lumière.

Voilà précisément la relation dont nous avons besoin tout à l'heure. En regardant les choses de près, on voit que le développement des idées ⁽¹⁾ précédentes conduit à ceci : Un point matériel, dans son déplacement, n'obéit pas à la loi ancienne de l'inertie, mais dirige son déplacement de façon à suivre les rayons d'une onde associée, sorte de pilote de sa direction, qui se propage avec la vitesse $u = \frac{c^2}{v}$ et qui possédera la fréquence

$$\nu = \frac{mc^2}{h}$$

que nous avons trouvée plus haut; cela revient à définir une longueur d'onde égale, comme toujours, à la vitesse de propagation divisée par la fréquence, soit :

$$\lambda = \frac{u}{\nu} = \frac{\frac{c^2}{v}}{\frac{mc^2}{h}} = \frac{h}{mv}.$$

En somme, la mécanique des points matériels se trouve ramenée à l'optique de pareilles ondes. Comme l'a dit l'auteur de cette théorie, « le principe de Maupertuis n'est qu'un aspect du principe de Fermat; il détermine les trajectoires possibles du point mobile dans un champ constant, parce que ces trajectoires coïncident avec les rayons d'une onde ». En particulier, s'il s'agit d'un flot de points matériels animés de la même vitesse v et si l'onde qui dirige leur mouvement vient à rencontrer des fentes fines, de petites ouvertures, des structures périodiques qui produisent en optique les phénomènes de diffraction, le flot de projectiles se partagera en faisceaux bien définis correspondant aux rayons diffractés de l'optique classique.

Il y a donc lieu d'associer à tout point matériel (électrisé ou non, car la théorie ne se limite aucunement à l'électron), doué d'une masse m ,

(1) Voir en particulier « La Mécanique ondulatoire » fascicule I du *Memorial des Sciences Physiques*. — Gauthier-Villars, 1928.

une longueur d'onde

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \text{qui devient} \quad \lambda = \frac{h\sqrt{1-\beta^2}}{m_0v}$$

si la vitesse n'est pas négligeable devant la vitesse de la lumière.

Dans quel domaine spectral vont tomber ces longueurs d'onde quand on remplace les constantes par leurs valeurs? La constante h de Planck est évaluée à

$$6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg-seconde}$$

et c'est quelque chose de très petit; si le dénominateur mv n'est pas lui-même très petit, λ sera extrêmement faible; à une longueur d'onde infiniment petite correspond une diffraction négligeable et l'on retombe, non pas sur l'optique physique avec ses phénomènes complexes, mais sur l'optique élémentaire des rayons lumineux qui se trouve ainsi représenter le cas de la mécanique usuelle, gouvernée avec une approximation largement suffisante par les anciennes lois.

Mais si l'on a affaire à un corpuscule de masse très faible, λ peut prendre une valeur appréciable; c'est le cas de l'électron. Le calcul montre alors que si le corpuscule électrisé a été lancé par une différence de potentiel V exprimée en volts, la longueur d'onde λ devient

$$\lambda = \frac{12,24}{\sqrt{V}} \cdot 10^{-8} \text{ centimètre}$$

Si l'on se reporte alors aux rayons X, on voit que les radiations avec lesquelles on réalise sans difficultés les expériences bien connues de la diffraction cristalline ont des longueurs d'onde comprises entre quelques unités Angström (l'unité Angström vaut 10^{-8} cm) et quelques centièmes d'unité Angström; cela donne dans l'expression précédente des valeurs de V allant de quelques dizaines de volts à plus de cent mille volts, donc à des tensions réalisables et applicables sans grande difficulté à un faisceau d'électrons.

L'expérience peut se tenter; elle l'a été avec un succès remarquable.

1° EXPÉRIENCES DE DAVISSON ET GERMER.

En 1925, MM. DAVISSON et GERMER travaillant au laboratoire Bell de New-York, s'étaient proposés de voir comment se comportait un pinceau d'électrons après avoir frappé un obstacle; ils n'avaient aucunement en vue la mécanique ondulatoire, alors toute jeune et bien peu connue.

Dans leurs premières expériences les électrons tombaient dans le vide sur un morceau de nickel et les premiers résultats, obtenus avec une pièce de métal quelconque, formée d'un grand nombre de petits cristaux, n'offrirent rien de remarquable; quand, à la suite d'un accident, la zone frappée par les corpuscules se trouva être constituée par quelques cristaux étendus. Les phénomènes changèrent alors complètement d'apparence et prirent une allure très analogue à ce que l'on aurait obtenu avec un rayonnement ondulatoire du type des rayons X.

L'appareil, placé tout entier dans le vide, comportait trois parties essentielles; d'abord le « canon » à électrons constitué par un filament incandescent, source des corpuscules, un champ électrostatique accélérateur et un dispositif de centrage du faisceau, puis la plaque cristalline de nickel placée sur le trajet des projectiles et enfin un collecteur d'électrons, sorte de cage de Faraday rendue mobile de façon à explorer les différentes directions. Le champ électrostatique pouvait prendre diverses valeurs de l'ordre de quelques centaines de volts; on observe alors des directions privilégiées correspondant à des maxima d'intensités et rappelant tout à fait ce qui se passe pour les rayons X, à la différence qu'ici, c'est uniquement la structure superficielle du cristal qui intervient, les électrons ne pénétrant pas à l'intérieur comme les rayons X. Les valeurs numériques donnèrent un accord satisfaisant avec la formule de la mécanique ondulatoire.

Ces physiciens américains ont donc été les premiers à obtenir la diffraction des électrons et à apporter ainsi une confirmation expérimentale à la nouvelle mécanique des corpuscules. Dans leurs expériences, et dans celles qui suivirent, toute interprétation des phénomènes par des rayons X secondaires, émis sous l'influence des électrons, a pu être éliminée par l'action d'un champ magnétique qui dévie, comme on le sait, les électrons en mouvement et n'influence pas les rayons de Röntgen.

Depuis cette date, les mêmes expérimentateurs ont repris leurs recherches en donnant à leur dispositif la forme ordinaire d'un spectrographe à rayons X avec cristal tournant et en ont ainsi confirmé et précisé les résultats.

2° EXPÉRIENCES DE G.-P. THOMSON.

M. G.-P. THOMSON, professeur de physique à l'Université d'Aberdeen est le fils de l'illustre Sir Joseph THOMSON; il a utilisé, pour montrer la

diffraction des électrons, un appareillage plus simple et d'un genre différent.

On sait que les rayons X, en traversant des lames minces formées d'un très grand nombre de petits cristaux disposés au hasard, comme par exemple des feuilles de métal, donnent lieu, sur une plaque photographique perpendiculaire à la direction du faisceau, à un système de cercles ou halos concentriques dont les dimensions sont liées aux constantes des cristaux et aux longueurs d'ondes employées ; j'ai montré moi-même autrefois que l'on pouvait ainsi obtenir de véritables spectres, et depuis, DEBYE et SCHERRER en Allemagne et HULL en Amérique ont basé sur ces phénomènes des méthodes d'analyses très employées aujourd'hui.

Ici, comme les électrons sont arrêtés par de très faibles couches de matière, il a fallu préparer des membranes aussi minces que possible en attaquant des feuilles d'aluminium par de la potasse caustique ou des feuilles d'or par de l'eau régale jusqu'à parvenir à des épaisseurs notablement inférieures à un millième de millimètre. On voit alors sur les clichés photographiques une série de halos dont les diamètres peuvent se mesurer et mettent en évidence la loi suivante :

En faisant croître la tension V , les diamètres d des anneaux décroissent de telle manière que le produit $d\sqrt{V}$ reste constant, ce qui est bien la caractéristique des diagrammes de diffraction dus à des radiations ondulatoires.

De plus, on peut, pour chaque valeur de V , et à l'aide des constantes cristallines que les rayons X ont permis de connaître, calculer la longueur d'onde $\frac{h}{mv}$. Ici encore la vérification de la formule de Louis de BROGLIE a été très bonne.

Dans les expériences d'Aberdeen, les tensions employées pouvaient varier de 10 000 à 60 000 volts, prolongeant ainsi dans un domaine très étendu la validité de la nouvelle mécanique.

EXPÉRIENCES DE RUPP.

Le physicien allemand RUPP a travaillé dans la même voie que G.-P. THOMSON, mais en employant des électrons très lents, correspondant par conséquent à des longueurs d'ondes associées beaucoup plus grandes. Il opérait aussi par la méthode des halos ; à cause de la faible pénétration des corpuscules, la préparation des écrans à traverser devenait beaucoup plus délicate. Il fallait, par exemple, condenser dans le

vide des vapeurs métalliques sur une plaque de sel gemme poli et bien desséché, puis dissoudre le support. Avec de telles pellicules, il devient naturellement impossible d'affirmer que l'on a affaire à une couche continue et sans trous; mais la question n'a pas grande importance parce qu'on peut montrer que des corpuscules ou des ondes passant par ces trous et touchant tangentiellement les cristaux des bords, doivent encore donner des anneaux de diffraction.

RUPP a aussi procédé à une expérience particulièrement démonstrative.

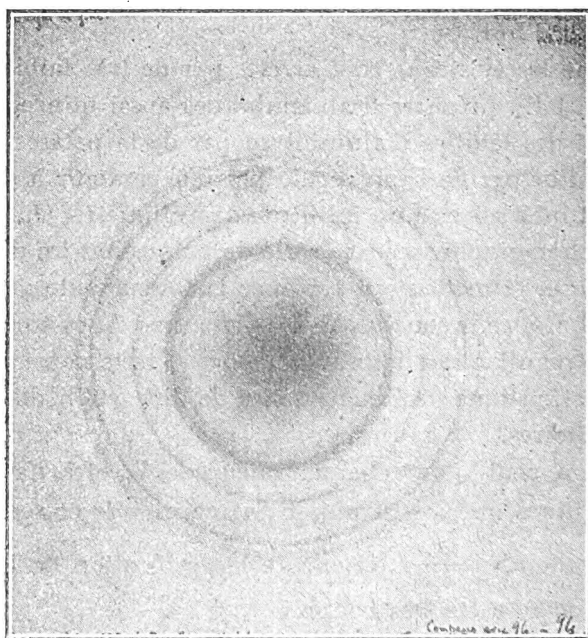


Fig. 1. — Cercles de diffraction produits par un faisceau d'électrons traversant une pellicule d'oxyde de zinc. (Ponte).

On sait qu'il a été possible d'obtenir (COMPTON, THIBAUD) le spectre de diffraction des rayons X au moyen de réseaux ordinaires à condition de les employer sous une incidence rasante. Cette méthode joint à l'avantage pratique de se prêter particulièrement à l'étude des rayons absorbables de grande longueur d'onde, puisqu'il n'y a pas de milieu matériel à traverser, le grand intérêt théorique de fournir une évaluation absolue des longueurs d'onde en fonction de la constante directement mesurée du réseau employé.

RUPP a réussi à exécuter des expériences du même type au moyen d'un faisceau d'électrons lents.

Il faut naturellement employer un réseau métallique pour éviter l'effet des charges statiques et utiliser également un faisceau fin et parfaitement défini de corpuscules; cette dernière condition est remplie en faisant passer les électrons dans un champ magnétique non uniforme dont l'effet correspond à celui d'une lentille vis-à-vis des rayons lumineux. On peut alors observer les spectres jusqu'au troisième ordre et les résultats ont vérifié, dans la limite des erreurs d'expériences, la formule fondamentale de la mécanique ondulatoire due à Louis de BROGLIE.

Enfin je dois signaler également de belles recherches dues à un jeune physicien français M. PONTE qui est parvenu, par des procédés très ingénieux, à diffracter des faisceaux d'électrons à travers des pellicules très minces d'oxydes métalliques et à enregistrer dans ces conditions les plus beaux diagrammes d'anneaux que l'on ait encore pu obtenir; la figure 1 permet d'en juger.

* *
* *

J'ai dit plus haut que les conceptions ondulatoires ne se limitaient pas aux électrons, mais que des corpuscules neutres et plus purement « matériels » tels que les atomes d'un gaz inerte, par exemple, en étaient aussi justiciables; des constatations positives paraissent déjà avoir été obtenues dans cette voie.

Tous ces résultats concordants mettent donc hors de doute la validité expérimentale des considérations théoriques très hardies dont nous avons parlé plus haut.

Les électrons, que tout le monde considère comme des projectiles, voient les lois géométriques de leurs mouvements gouvernés par des ondes et la vérification quantitative de la formule qui donne la longueur de ces ondulations nouvelles, a pu être faite d'une façon remarquablement satisfaisante.

Que sont ces ondes qu'il faut associer aux déplacements des points matériels? Faut-il les regarder comme des radiations ayant une existence physique, ou bien comme un artifice de calcul permettant d'exprimer la loi d'un mouvement? Bien que cette dernière conception paraisse plus vraisemblable, la question n'est pas encore tranchée aujourd'hui. On a fait remarquer que leur vitesse de propagation $\frac{c^2}{v}$

est plus grande que celle de la lumière, ce qui paraît au premier abord contraire aux conceptions fondamentales de la relativité. En y regardant de plus près, on peut montrer que c'est la phase qui se propage avec la vitesse $\frac{c^2}{v}$, tandis que l'énergie du phénomène accompagne les électrons avec la vitesse v , de sorte que les manifestations physiquement observables ne dépassent pas la vitesse de la lumière et restent sagement conformes à la théorie d'Einstein.

La mécanique joue parmi les autres sciences un rôle particulièrement important au point de vue philosophique, puisqu'on regarde généralement un phénomène comme expliqué, quand on l'a rangé sous ses lois; mais, on a quelquefois perdu de vue le fait que la mécanique est une science physique dont les bases sont expérimentales. Tout changement dans ses principes prend donc une valeur et une portée qui s'étendent à toute la philosophie de la nature.

RÉSUMÉ

La mécanique est, en réalité, une science expérimentale dont les bases ont longtemps reposé sur les données acquises au temps de Galilée et de Newton : il est même très remarquable que ces seules assises aient suffi pendant si longtemps malgré le prodigieux développement des sciences physiques.

La Relativité d'Einstein a cependant montré qu'un remaniement s'imposait; mais, à sa suite, une théorie nouvelle qui fait jouer aux phénomènes ondulatoires un rôle primordial et apporte une modification profonde aux principes même de la dynamique, vient de recevoir de l'expérience une série de confirmations remarquables; l'optique prend en quelque sorte le pas sur la mécanique. C'est dans le mouvement des corpuscules tels que les électrons que ces conceptions ont prouvé leur nécessité; une voie toute nouvelle vient de s'ouvrir pour la physique des atomes.

CONSIDERATIONS SUR L'EMPLOI DE L'APPAREIL « TÉLÉTYPE » DANS LES BUREAUX TÉLÉGRAPHIQUES A FAIBLE TRAFIC ET RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

par M. MERCY, *Inspecteur des Postes et Télégraphes.*

*Inconvénients du Hughes, du Morse et du Baudot. — Caractéristiques
du télétype.*

Le télétype est un appareil télégraphique ne nécessitant pas d'apprentissage et pouvant remplacer le Hughes et le Morse.

Transmettre un télégramme est une opération qui n'est pas à la portée de tout le monde. Il faut un apprentissage assez laborieux pour arriver à se servir correctement du manipulateur Morse et à déchiffrer rapidement sur la bande du récepteur les signaux du code, composés de traits et de points.

La lecture s'apprend assez vite et n'importe qui peut parvenir à l'habileté requise. Mais il n'en est pas de même de la manipulation qui exige une aptitude manuelle et le sens du rythme. Si la réception doit être auditive au lieu d'être visuelle, la difficulté devient plus grande, car l'aptitude joue ici un rôle plus important encore. Certains élèves apprennent avec une rapidité stupéfiante ; beaucoup, demandent de longs exercices et quelques-uns même n'arrivent jamais à acquérir cette faculté qui consiste à discerner dans le bruit de l'armature du « parleur » les points des traits, le nombre et la place de chacun de ces éléments et finalement à traduire instantanément par une lettre ou un chiffre l'ensemble du signal perçu. Mais le télégraphiste qui ne possède que le Morse n'est pas un professionnel accompli ; il faut encore qu'il soit capable de manœuvrer les appareils imprimeurs, le Hughes et le Baudot ; et il doit s'astreindre de nouveau à un apprentissage long et ardu pour chaque type d'appareil. En somme

(1) Communication présentée par M. Bonnin à la séance de la 5^e section du 3 mai 1929.

un agent d'aptitude moyenne ne possède vraiment son métier qu'après 18 mois de service et d'études.

La longueur de cette préparation, indépendamment de la perte de rendement qu'elle occasionne, est une cause de gêne dans le service, parce que les agents ne sont pas interchangeables, parce que l'absence d'un spécialiste se traduit par un ralentissement dans l'écoulement du trafic. L'inconvénient est sensible, mais supportable dans les grands centres disposant d'effectifs importants : il est désastreux dans les stations de faible trafic, parce qu'il faut recourir à l'emploi d'unités malhabiles dont la transmission sera souvent illisible pour le correspondant.

On dira qu'il suffit d'apprendre la manipulation à tous les agents pour supprimer l'inconvénient. Le procédé a déjà été appliqué : le résultat a été négatif. C'est qu'en réalité, la manipulation des appareils télégraphiques est une gymnastique et qu'elle est, comme telle, soumise aux principes consacrés par l'expérience des sports. L'axiome fondamental sur lequel reposent ces principes est celui-ci : la condition primordiale de la maîtrise, c'est l'entraînement. L'échec de la mesure prise pour parer à l'inconvénient de la spécialisation est dû à la méconnaissance de cette vérité ; car on peut dire qu'un télégraphiste qui n'exerce son métier que de loin en loin ne sera jamais « en forme » et ne fera qu'un médiocre opérateur.

Le très grand désavantage du Morse, que la lecture ait lieu au son ou à la bande, c'est qu'il faut apprendre à recevoir, c'est-à-dire à traduire les signaux et à les écrire manuellement sur la formule du télégramme. Le Hughes et le Baudot donnent une bande imprimée en caractères typographiques : il n'y a donc pas d'apprentissage à faire pour la réception. Mais le Hughes exige la présence du télégraphiste pour surveiller la réception que peut troubler à tout instant un défaut de synchronisme ou une mauvaise combinaison du correspondant, ou encore un écart trop grand entre deux émissions successives. Il faut alors « couper » la transmission du correspondant, le faire reprendre à l'endroit voulu et ramener la roue des types à une position repérée et toujours la même (rappel au blanc).

Le Baudot n'a pas cet inconvénient ; mais il faut cependant qu'un « dirigeur » exerce une surveillance des différents organes de l'installation, distributeurs et traducteurs. De plus une variation de vitesse, même faible, peut détruire le synchronisme soit entre les deux postes correspondants, soit entre distributeur et traducteur.

La nécessité de la présence de l'opérateur du poste correspondant.

lorsqu'on désire transmettre un télégramme, présente dans la pratique un inconvénient très grave. En effet, par raison d'économie, dans beaucoup de stations et surtout dans les bureaux à faible trafic, on ne laisse pas en permanence devant l'appareil un télégraphiste prêt à répondre au premier appel. Le « télégraphiste » doit s'occuper aussi du guichet, de la cabine téléphonique, de la comptabilité et des écritures, des opérations postales même. Il est évident, dans ces conditions, qu'il ne pourra souvent quitter sa besogne pour « répondre » aux appels de son collègue de l'autre station. Il arrive même que ce dernier, qui a les mêmes charges, après avoir vainement appelé pendant 4 ou 5 minutes, passera à un autre genre d'occupation et ne sera plus disponible quand le premier sera en mesure de recevoir le télégramme. Fréquemment ces délais, ces « non-réponses », atteignent 10 minutes et quelquefois davantage. La transmission d'un télégramme ordinaire qui ne demande que deux minutes, au Morse, immobilise ainsi un agent pendant 12 minutes, c'est-à-dire pendant un temps six fois plus long qu'il n'est réellement nécessaire. Et l'économie que l'on avait en vue disparaît en grande partie.

L'appareil idéal serait donc celui qui n'exigerait aucun apprentissage pour la transmission ou la réception des messages ; qui fonctionnerait automatiquement à la réception sans que la présence de l'opérateur du bureau soit nécessaire ; qui donnerait une traduction imprimée du message et qui, enfin, serait assez robuste pour être mis entre toutes les mains.

Des efforts ont été faits dans cette voie et divers appareils ont vu le jour. Le Télétipe est un des derniers nés de cette catégorie. L'Administration française, soucieuse d'améliorer son outillage pour le mettre à hauteur des exigences du progrès et des conditions sociales actuelles, vient de doter de ce nouvel appareil plusieurs lignes urbaines parisiennes et les constatations faites après 6 mois de service paraissent favorables à l'adoption du système.

L'appareil a l'aspect et les dimensions d'une machine à écrire, dont il possède d'ailleurs le clavier alphabétique. Il suffit d'abaisser une touche pour produire l'impression du caractère correspondant sur une bande de papier, non seulement dans l'appareil même, mais encore dans l'appareil du poste placé à l'autre extrémité de la ligne. Pour frapper les touches, il n'est pas nécessaire d'observer une cadence comme au Baudot ou bien encore de s'astreindre à ne pas laisser écouler un temps trop long entre deux frappes, comme au Hughes : l'opé-

rateur peut, tout à loisir, chercher les touches à frapper et, quelle que soit son inexpérience, donner du télégramme une transmission aussi correcte que celle du dactylographe le plus habile; il aura seulement mis plus de temps que ce dernier pour mener à bien sa tâche.

L'expérience a confirmé la valeur du système à ce point de vue particulier; ainsi, dès le premier jour de la mise en service de l'appareil, une dame employée, n'ayant aucune pratique de la machine à écrire, ni des appareils télégraphiques imprimeurs a pu, en quelques heures, transmettre ou recevoir 86 télégrammes constituant la totalité du trafic du bureau.

La vitesse maximum que permet l'appareil est de 45 mots-types (5 caractères et un espace) à la minute, soit 4 frappes et demie à la seconde: c'est la vitesse moyenne d'un bon dactylographe.

Ce rendement de 45 mots à la minute est très honorable, si l'on considère que celui d'un secteur Baudot est de 30, celui du Hughes de 36 à 50 et celui du Morse de 15 à 20 mots dans le même temps.

Un dispositif permet de mettre en marche et d'arrêter l'appareil du poste correspondant sans appel préalable.

La substitution d'un appareil du genre du télétype au Morse et au Hughes permettrait de réaliser l'unité de manipulation. En effet, la préparation des bandes utilisées pour la transmission automatique au Baudot s'effectuant au moyen de claviers alphabétiques semblables à celui du télétype, les télégraphistes n'auraient qu'une manipulation à apprendre pour être capables de desservir l'un ou l'autre type d'appareil.

L'outillage télégraphique ne comporterait plus ainsi que deux systèmes d'appareils à manipulation uniforme: le Baudot pour les communications à grand rendement, le télétype, ou un de ses congénères, pour les lignes à moyen et faible trafic.

Voici pour finir quelques renseignements techniques.

Le code employé est le code à 5 moments déjà utilisé par Baudot. L'abaissement d'une touche du clavier détermine mécaniquement la mise en action de 6 leviers servant à l'émission des courants sur la ligne. Cinq leviers sont destinés à la formation des combinaisons du code; le sixième émet un courant à la suite de toute combinaison transmise afin d'arrêter la roue des types du récepteur sur une position nettement déterminée. Cet arrêt de la roue des types après chaque combinaison constitue une sorte de rappel au blanc automatique et permet d'éviter l'emploi d'un système correcteur des écarts de synchronisme des deux appareils correspondants.

Le synchronisme n'étant nécessaire que pendant la durée de la sélection, c'est-à-dire pendant les $\frac{2}{3}$ de la révolution du combinateur, les vitesses des deux postes peuvent subir des variations ou des différences de 10 pour cent en plus ou en moins du taux normal, sans que le fonctionnement du système en soit troublé. L'appareil récepteur ressemble beaucoup à un traducteur Baudot : on y retrouve les leviers aiguilleurs, le combinateur, les chercheurs, la came navette, la roue d'impression, avec son dispositif d'inversion, le bras d'impression, le levier de rappel, etc.

La principale particularité, c'est que le télétype ne possède qu'un seul électro-aimant (au lieu de cinq) ; l'armature de cet organe qui n'est pas polarisé, est maintenue au contact du noyau sous l'action du courant de ligne pendant les périodes de repos. C'est qu'en effet le télétype est une sorte de Baudot n'employant qu'un seul sens du courant et ce sont les interruptions du courant de ligne qui déterminent le déclenchement de l'armature, ce qui peut se produire jusqu'à 6 fois par révolution. L'impression typographique s'opère sur bande gommée dans les mêmes conditions que dans le traducteur Baudot.

Une seule des deux stations correspondantes est pourvue d'une batterie de ligne et fournit le courant à l'autre station. L'intensité de celui-ci est de 50 à 60 mA.

Rapports Annuels de la 2^e Section du Comité sur les Progrès réalisés dans la Technique de l'Éclairage

(Suite)

SOMMAIRE :

- 1^o Résultats de quelques essais récents sur les lampes à vapeur de mercure, par M. Maurice LEBLANC, p. 710.
- 2^o Lampes à incandescence, par M. MAISONNEUVE, p. 717.
- 3^o Etat actuel de la photométrie, par M. JOUAUST, p. 720.
- 4^o Les progrès de l'optique physiologique, par M. le D^r HAAS, p. 728.
- 5^o L'éclairage des studios et ses perfectionnements en 1928, par M. CABET, p. 736.
- 6^o L'industrie des enseignes lumineuses, par M. FONSEQUE, p. 747.
- 7^o Balisage des itinéraires nocturnes d'avions, par M. ABADIE, p. 749.
- 8^o Compte rendu sur la propagande d'éclairage, par M. COHU, p. 756.

RÉSULTATS DE QUELQUES ESSAIS RÉCENTS SUR LES LAMPES A VAPEUR DE MERCURE

Par M. M. LEBLANC.

Répartition de l'énergie dans le spectre visible — Brilliance. — Vieillessement. — Durée. — Distribution de la lumière. — Caractéristiques électriques. — Influence de la température. — Recherches poursuivies au Laboratoire de Brown Boveri.

Les Illuminating Engineering Laboratories de la General Electric Co. à Schenectady, ont procédé à quelques nouveaux essais sur les lampes à vapeur de mercure dont les résultats ont été publiés sous la signature de F. BENFORD et sous le titre de « La radiation visible de l'arc à vapeur de mercure à basse pression », dans le numéro 30 des *Transactions of the Society of Motion Picture Engineers*. Nous donnons ci-dessous la traduction de quelques extraits de cette publication.

1^o. — *Répartition de l'énergie dans le spectre visible donnée par la lampe.*

Cette détermination a été faite par une méthode spectrophotomé-

trique par comparaison avec une lampe à incandescence fonctionnant à une température de couleur de 2954°K .

On ne trouve dans la littérature scientifique que peu de renseignements dignes de foi sur les intensités relatives des différentes raies du spectre du mercure, parce que la densité de courant et la température du tube peuvent varier dans de grandes proportions et modifier le rapport des énergies correspondant aux différentes raies.

En représentant par 100 l'énergie totale émise dans le spectre visible de la lampe entre 400 et 700 $m\mu$ la distribution de cette énergie entre les différentes raies du spectre est la suivante pour un tube du type commercial d'éclairage pour courant continu 110 volts 3,5 ampères :

Longueur d'onde	En centièmes
404,7 à 407,8	violet 25,33
434,8 à 435,9	bleu 32,60
491,6	bleu-vert 0,13
546,1	vert 30,90
576,9 à 579	jaune 11,04

Si on multiplie ces différents rapports par les facteurs de visibilité correspondants (pris sur la courbe de visibilité de l'œil moyen) on obtient les chiffres ci-dessous qui montrent comment les différentes régions du spectre interviennent dans la lumière donnée par un tube à vapeur de mercure :

	En centièmes
Violet	0,66
Bleu	1,37
Bleu-vert	0,17
Vert.	73,30
Jaune	25,10

Ces deux tableaux mettent en évidence, le premier, la raison des propriétés actiniques du rayonnement des lampes à mercure, le second la raison de la coloration verte de leur lumière.

2°. — *Brillance du tube.*

En relevant les dimensions d'un lot de 70 tubes, on a trouvé un diamètre extérieur moyen de 24,4 mm avec une épaisseur de paroi de 1 mm. La longueur de la partie lumineuse du tube étant 1,27 m, la

surface intérieure de l'arc dont dépend sa brillance moyenne est 890 cm^2 . Une mesure de la brillance sous différents angles montre qu'elle n'augmente pas de plus de 5 pour cent pour une direction faisant un angle de 70° avec la normale. Ceci est un peu surprenant car, dans une telle direction l'épaisseur de gaz intéressée est égale à trois fois le diamètre du tube et, par suite, si la vapeur était parfaitement transparente, la brillance devrait être trois fois celle mesurée dans une direction normale. Quelques recherches ont été faites pour éclaircir ce point, mais le travail est peu avancé, car on doit tenir compte, non seulement des propriétés émissives et absorbantes de la vapeur, mais des phénomènes de polarisation, de réflexion, etc... introduits par le tube de verre.

En prenant la brillance dans la direction normale comme unité, à 45° la brillance est 0,99 puis elle s'élève graduellement jusqu'à un maximum de 1,07 à 50° et ensuite tombe rapidement pour ne plus être que 0,58 à 80° . Ceci explique pourquoi les courbes de distribution de la lumière donnée par un tube à mercure se rapprochent beaucoup de celle d'un filament rectiligne incandescent, de brillance uniforme sous tous les angles. La brillance est inversement proportionnelle au diamètre du tube ; une diminution de 1 pour cent sur le diamètre conduit à une augmentation d'environ 1 pour cent de la brillance.

3°. — *Vieillessement du tube.*

Il a été nettement établi que la diminution d'intensité du tube avec l'âge est due à un noircissement du tube, mais qu'il ne se produit aucun changement, ni dans l'arc lui-même ni dans le tube de verre.

Ce noircissement, contrairement à ce qui se passe avec les lampes à incandescence, n'est pas l'indice d'une fin prochaine du tube, qui meurt généralement par mauvais vide ; en pratique, on arrive à une période où le tube devient trop difficile à allumer pour pouvoir continuer à être utilisé.

Le noircissement est causé par le fer de l'anode. Un tube neuf, qui n'a fonctionné que quelques heures, laisse passer environ 80 pour cent de la lumière incidente, excepté au voisinage de la cathode, où un dépôt momentané de mercure réduit la transmission à environ 70 pour cent. Ce dépôt se forme quand le tube est froid et le diamètre des gouttes tend à augmenter quand le tube vieillit. Ce dépôt disparaît entièrement quand le tube a fonctionné assez longtemps pour s'échauffer uniformément.

Il faut remarquer que le même tube transmet plus de 95 pour cent de la lumière créée à l'intérieur, les faibles valeurs citées plus haut sont dues à des phénomènes de réflexions qui, dans le cas d'une source intérieure, ne jouent pas un rôle important.

Après un fonctionnement de 834 heures, la région au voisinage de la cathode présente la transmission maxima 58 pour cent, puis vient un court espace où elle tombe à 50 pour cent, de ce point jusqu'au centre du tube elle croît jusqu'à 56 pour cent et ensuite décroît continuellement jusqu'à environ 39 pour cent près de l'anode. Ce minimum au voisinage de l'anode a été observé dans tous les essais et est une preuve de l'influence du fer de cette électrode dans le noircissement du tube.

La dépréciation est d'environ 10 pour cent pour les 1 000 premières heures, mais le taux de dépréciation diminue jusqu'à environ 2 pour cent entre 3 000 et 4 000 heures et ce taux semble se maintenir jusqu'à environ 10 000 heures.

Sur quelques lampes qui ont dépassé 40 000 heures, on a pu se rendre compte que ce taux de dépréciation allait encore en s'affaiblissant quand la durée augmente. La vitesse de noircissement s'élève si on augmente la charge dans le tube.

4°. — *Durée des tubes.*

Des essais exécutés sur plusieurs lots de tubes ont montré que le nombre des mises hors service sur un lot initial de 100 tubes se répartissait, dans le temps, de la manière suivante :

Epoques en heures	Nombre de mises hors service	
	Partielles	Totales
—	—	—
0 à 1 000	11	11
1 000 à 2 000	3	14
2 000 à 3 000	4	18
3 000 à 4 000	10	28
4 000 à 5 000	12	40
5 000 à 6 000	12	52
6 000 à 7 000	10	62

5°. — *Courbe de distribution de la lumière.*

Comme nous l'avons dit précédemment, la courbe de distribution

lumineuse d'un tube neuf est sensiblement celle d'un filament incandescent rectiligne.

En général, la partie supérieure du tube noircit plus vite que la partie inférieure. Ainsi, dans un cas particulier où au bout de 4 000 heures la dépréciation totale était de 18,6 pour cent, elle était presque impossible à mesurer suivant la normale descendante, tandis qu'elle était de 33 pour cent suivant la normale ascendante.

La relation entre ces deux dépréciations est très variable et la raison de ce phénomène n'est pas évidente, car on constate de grandes variations dans un groupe de lampes qui semblent toutes avoir fonctionné dans des conditions identiques.

Le réflecteur généralement utilisé avec ces lampes a la forme d'un demi-cylindre circulaire qui arrête toute la lumière dans l'hémisphère supérieur. La forme de la courbe de distribution est profondément modifiée et se rapproche alors de celle d'un disque lumineux tourné vers le bas. Cette similitude s'accroît avec l'âge du tube. Le fait que le noircissement du tube intéresse surtout la partie qui fait face au réflecteur a la conséquence curieuse que le rendement du réflecteur augmente avec l'âge du tube et passe de 81,9 pour cent pour un tube neuf à 83,5 pour cent après 4 000 heures.

6°. — *Caractéristiques électriques.*

L'arc à vapeur de mercure à basse pression possède les caractéristiques générales d'un arc à l'air libre, mais le fait qu'il est enfermé dans une enceinte close, introduit quelques caractéristiques particulières; ainsi, l'intensité lumineuse varie avec le diamètre du tube et l'arc est très sensible à la température ambiante, tandis que l'arc entre charbons y paraît complètement insensible. Ces propriétés rendent très difficiles des mesures photométriques précises sur le tube à vapeur de mercure. Mais le fait que la longueur de l'arc est parfaitement définie, lui assure un fonctionnement plus stable que s'il était libre de changer constamment de forme. A chaque dimension du tube correspond un régime de rendement maximum.

7°. — *Influence de la température.*

L'arc à mercure est sensible à la température ambiante et par suite il faut avoir très grand soin, dans les mesures photométriques, d'attendre qu'il ait atteint son équilibre thermique.

Des essais ont été faits, la température ambiante variant entre 25° C et 66° C. On constate que l'intensité passe par un maximum pendant la première demi-minute qui suit l'allumage et ensuite décroît rapidement. Aux plus basses températures, elle passe par un minimum entre 2 et 5 minutes pour recommencer à croître et atteindre sa valeur finale après 12 minutes environ. Aux températures plus élevées, l'intensité décroît régulièrement pour atteindre une valeur constante après 8 ou 10 minutes. Aux températures voisines de 30° C, une lecture prématurée avant que le tube ait atteint son équilibre thermique peut donner une valeur de 15 pour cent trop élevée ou 25 pour cent trop basse suivant l'instant de la lecture, mais à 50° C le résultat peut être 60 pour cent au-dessus de la valeur qui sera finalement atteinte.

Dans la *Revue B. B. C.* de janvier 1929, sont relatés quelques essais effectués par le Laboratoire de Physique des Usines Brown-Boveri, sur l'arc à mercure au cours de l'année 1928.

La température de la tache cathodique, maintenue fixée sur une tige de tungstène placée au milieu de la cathode, a été mesurée avec un pyromètre optique d'Holborn et Kurlbaum et trouvée égale à 2087° C $\pm$ 25°. La mesure a été faite avec un redresseur de construction spéciale dans lequel on pouvait observer la cathode à travers une ouverture munie d'une glace.

Ce laboratoire a également procédé à des mesures de la chute de tension dans un arc à courant continu dans la vapeur de mercure. L'arc brûle entre une électrode fixe en fer et une cathode mobile en mercure dans un tube barométrique vertical de 2,5 cm de diamètre intérieur et d'environ 80 cm de longueur. On règle à volonté la longueur de l'arc en faisant varier le niveau du mercure par des moyens pneumatiques. Afin de refroidir le tube dans lequel jaillit l'arc, on peut le placer dans un coffret en bois rempli d'huile pour transformateur.

Avec un courant constant de 4,46 A dans l'arc, une longueur d'arc de 71 cm et le tube n'étant refroidi que par l'air, la chute de tension dans l'arc est d'environ 40 à 42 V immédiatement après l'allumage puis atteint environ 50 à 53 V après environ 30 secondes. Il se produit ensuite pendant quelques instants de très fortes variations irrégulières de la tension de l'arc; au bout d'environ 60 secondes, cette dernière diminue suivant une courbe régulière assez fortement inclinée et prend une valeur de 40 à 41 V.

Si la partie inférieure du tube est refroidie à environ 20° C par une bonne circulation d'huile, la tension de l'arc, faible au début (44 V

environ) croît rapidement jusqu'à 54 V pendant les 15 secondes suivantes; elle diminue encore jusqu'à 48 V pour remonter enfin lentement à une valeur stationnaire de 50 V c'est-à-dire à une tension de 10 V supérieure à celle mesurée sans la réfrigération.

A ces oscillations qu'on peut constater avec des instruments de mesure ordinaire, il s'en superpose encore d'autres, de l'ordre de grandeur de 70 à 80 pour cent des précédentes à très hautes fréquences qui ne peuvent être décelées qu'à l'aide d'un oscillographe.

La chute de tension totale dans l'arc en fonction de sa longueur est représentée graphiquement par une droite et il en est de même de la chute de tension à l'anode (?)

Pour une longueur d'arc constante, la chute de tension dans l'arc varie peu en fonction du courant. La chute de tension dépend par contre beaucoup de la pression résiduelle. Avec un courant constant de 4,46 A, la chute de tension dans l'arc varie de 59 à 48 V suivant que le vide est de 0,0025 mm de mercure ou qu'il est poussé à 0,001 mm.

LAMPES A INCANDESCENCE

Par M. MAISONNEUVE

Lampe série Standard ; ses caractéristiques. — Lampes spéciales pour studios : dispositifs antiéblouissants.

A. — LAMPES D'ÉCLAIRAGE GÉNÉRAL

L'année 1928 a été marquée par l'apparition d'une nouvelle lampe : la lampe série Standard qui, si elle est accueillie favorablement par les usagers, permettra de réaliser, à plus ou moins brève échéance, une normalisation effective des lampes à incandescence.

Cette normalisation serait très désirable, car le grand nombre de modèles qui existent sur le marché ne répond pas à un besoin justifié, beaucoup de types faisant double emploi.

La cause de cette diversité réside surtout dans le développement très rapide de l'éclairage par l'électricité, développement au cours duquel on ne s'est aucunement soucié de l'unification des types ; leur nombre s'est ainsi accru très rapidement.

Les principales caractéristiques de la lampe série Standard sont les suivantes :

— *forme* ; intermédiaire entre la forme poire à parois droites, la forme sphérique avec col et la forme sphérique sans col, qui permet d'employer cette lampe dans tous les appareils utilisant jusqu'ici les anciens types ;

— *dépolissage intérieur de l'ampoule* : nouveau mode de dépolissage, grâce auquel l'éblouissement est évité, sans qu'il en résulte une perte sensible de lumière (l'absorption est de l'ordre de 2 pour cent seulement). La surface extérieure de l'ampoule étant lisse, son nettoyage est facile ;

— *filament spiralé*, qui, par sa disposition en couronne, donne l'intensité lumineuse maximum dans la direction de l'axe de la lampe, c'est-à-dire vers le plan utile.

Cette lampe se fabrique pour les puissances normalisées par l'Union des Syndicats de l'Électricité, c'est-à-dire : 15, 25, 40, 50, 75 et 100 watts.

Le milieu (vide ou gaz), dans lequel est placé le filament, a été déterminé suivant la puissance, afin d'obtenir le rendement maximum : c'est pour cette raison que les lampes 15 et 25 W sont dans le vide et les autres types à atmosphère gazeuse.

Les 6 types de la série Standard sont susceptibles de remplacer efficacement plus de 100 types actuellement en circulation : telle est la simplification considérable qu'entraînerait l'adoption de cette lampe.

Il en résulterait d'importants avantages, tant pour l'électricien revendeur que pour le consommateur.

L'électricien pourrait utiliser de la façon la plus rationnelle les locaux affectés au stockage des lampes, puisqu'ils ne contiendraient, désormais, que des lampes d'usage courant et ne seraient plus encombrés par les lampes démodées dont l'amortissement doit entraîner un jour ou l'autre des pertes importantes. Il en résulterait le maximum de simplicité dans la classification des stocks et la tenue de la comptabilité.

Le consommateur serait ainsi toujours certain de trouver la lampe dont il aurait besoin, car l'approvisionnement de tous les types serait facilement assuré. L'adoption de cette lampe éliminerait toute hésitation de la part de l'acheteur, puisqu'il serait sûr de recevoir automatiquement, pour chaque puissance, la lampe qui, techniquement, est la meilleure. Il est, en outre, à présumer qu'elle permettrait à l'utilisateur d'apprécier de plus en plus les avantages incontestables de la lumière diffuse qui est la base du bon éclairage.

B. — LAMPES A INCANDESCENCE SPÉCIALES POUR L'ÉCLAIRAGE DES STUDIOS.

L'utilisation des lampes à incandescence pour l'éclairage des studios a pris, au cours de l'année 1928, une nouvelle extension.

Les lampes employées peuvent se classer dans les 2 catégories suivantes :

a) lampes à foyer lumineux concentré qui, placées dans des projecteurs, sont destinées à produire des faisceaux de très faible ouverture, en vue de donner aux sujets le modelé désiré ;

b) lampes à atmosphère gazeuse de types courants, dont le filament est disposé en couronne ou en festons. Ces lampes équipent des appareils donnant des faisceaux d'assez grande ouverture, destinés à produire l'éclairage général du studio. Les puissances employées sont variables et dépendent du type d'appareil utilisé et des dimensions de la scène à cinématographier.

On emploie également, pour l'éclairage général, des lampes 500 ou 1 000 watts, de forme cylindrique, à filament disposé suivant l'axe de la lampe.

Lorsqu'on utilise uniquement les lampes à incandescence, celles-ci doivent avoir un filament suffisamment poussé, afin de donner les radiations nécessaires à la prise de vues sur films panchromatiques. On emploie, parfois, avec les lampes à vapeur de mercure, des lampes à incandescence dont on diminue intentionnellement le rendement du filament, afin d'obtenir une lumière riche en radiations de grande longueur d'onde qui s'ajoute à celle émise par les lampes à vapeur de mercure.

D'une façon générale, le degré auquel doit être poussé le filament dépend essentiellement de la constitution chimique du film destiné à la prise de vues.

Différentes solutions ont été proposées pour réduire l'éblouissement ; parmi celles qui intéressent la lampe elle-même, citons : le dépolissage des ampoules, et l'emploi d'ampoules opales.

RAPPORT SUR L'ÉTAT ACTUEL DE LA PHOTOMÉTRIE

par M. JOUAUST.

Photométrie hétérochrome ; divergences entre les résultats obtenus dans les divers laboratoires nationaux ; photométrie des tubes au néon. — Etude des matériaux utilisés dans l'art de l'éclairage. — Emploi du photomètre à scintillation. — Photométrie physique (par l'emploi des cellules photoélectriques).

1° Photométrie hétérochrome.

Le problème de la photométrie hétérochrome, du moins en ce qui concerne les sources usuelles, ne se pose pas pour les laboratoires industriels. Ceux-ci, en effet, disposent d'étalons identiques aux lampes qu'ils ont à étudier.

Il ne se pose que pour les laboratoires gardiens des étalons primaires et chargés de fournir à l'industrie les étalons secondaires mentionnés plus haut. La bougie internationale utilisée en Angleterre, aux États-Unis et en France, est représentée, dans chacun des laboratoires officiels de ces trois pays, par des lots de lampes à incandescence à filament de charbon, fonctionnant à une température correspondant à une consommation spécifique de 4 watts par bougie d'intensité moyenne sphérique.

C'est au moment du passage de ces étalons primaires à filament de carbone aux étalons secondaires à filament de tungstène dans le vide, que se pose le problème de la photométrie hétérochrome. Il se pose également au passage des lampes à filament de tungstène dans le vide, aux lampes à atmosphère gazeuse, destinées à faire des étalons de flux.

Le mode opératoire pour effectuer ce passage n'est pas le même dans les divers laboratoires ; il en est résulté certaines divergences. C'est ainsi que dans les comparaisons de lampes à filament de charbon photométrées dans un des trois pays employant la bougie internationale et en Allemagne à la Physikalisch technische Reichsanstalt, on trouve bien la valeur de 1,11 pour le rapport bougie internationale sur Hefner, mais que ce rapport s'élève à 1,14 quand il s'agit de lampes à filament

de tungstène dans le vide et à 1,17 pour les lampes à atmosphère gazeuse.

Pour éviter ces divergences, lors d'une réunion tenue à Beilagio après la clôture de la session de la Commission internationale de l'Eclairage, les représentants du National Physical Laboratory, du Bureau of Standards, de la Physikalisch technische Reichsanstalt, ont décidé d'employer le mode opératoire suivant pour passer de la lampe à filament de carbone à la lampe à filament de tungstène dans le vide : Placer devant la lampe à filament de charbon un verre bleu, modifiant la coloration qu'elle produit sur l'écran du photomètre, de façon qu'elle soit la même que celle produite par la lampe à filament de tungstène dans le vide.

Dans ces conditions, il est nécessaire de déterminer le coefficient d'absorption du verre bleu. Ce coefficient d'absorption doit être évalué en déterminant, au spectrophotomètre, le facteur de transmission du verre pour les diverses radiations et en utilisant la courbe de visibilité de Gibson.

Ce mode opératoire a donné lieu à un important travail de Taylor, paru dans les Transactions of Illuminating Society et, à la Convention de l'Illuminating Society en septembre 1928, MM. CRITTERDER et TAYLOR ont communiqué les résultats de comparaisons des facteurs de transmission de divers verres, faites par les principaux laboratoires américains.

Des verres bleus circulent en ce moment dans les laboratoires officiels d'Angleterre, d'Allemagne, des Etats-Unis et de France. Lorsque ces comparaisons seront terminées, il sera sans doute possible de faire le choix d'un verre type et probablement on verra disparaître les divergences signalées plus haut.

Le point faible de la méthode signalée plus haut est dans la nécessité d'effectuer des mesures spectrophotométriques.

On ne dispose pas à l'heure actuelle, de bons spectrophotomètres et dans le rapport sur la précision des mesures photométriques présenté à Saranac Inn, par le professeur Mac Gregor MORRIS au nom du Comité d'éclairage britannique, les auteurs n'attribuaient aux mesures spectrophotométriques qu'une précision de 10 pour cent.

En attendant qu'une méthode uniforme de photométrie hétérochrome ait été adoptée, la Commission internationale de l'éclairage à Saranac Inn a adopté la décision suivante.

« En attendant l'adoption d'une méthode uniforme de photométrie hétérochrome, il paraît nécessaire d'indiquer les valeurs actuelle-

ment utilisées pour les Laboratoires nationaux des rapports de l'Hefner aux étalons internationaux.

Etalons	Température de couleur	Rapports
Lampe à filament de carbone	2000°K	1,11
Lampe à filament de tungstène dans le vide.	2360°K	1,145
Lampe à atmosphère gazeuse.	9600°K	1,17

Cette décision a soulevé quelques protestations du représentant du Laboratoire Central d'Electricité qui, estimant regrettable de voir donner une sanction officielle aux résultats erronés de mesures incorrectes et qui a signalé, en outre, que si la France était en accord avec les autres laboratoires utilisant la bougie internationale dans les mesures effectuées sur les lampes à filament de tungstène dans le vide, elle était en désaccord pour les mesures de flux.

Le Laboratoire Central, depuis Saranac Inn, a eu l'occasion de faire des mesures comparatives avec les autres Laboratoires nationaux, mesures qui ont bien mis en évidence ces divergences. Des études sont en cours pour en déterminer la cause et apporter un remède à cet état de choses regrettable. Nous donnons en annexe le résultat de ces comparaisons internationales.

Jusqu'ici, nous n'avons envisagé la question de la photométrie hétérochrome qu'au point de vue des sources usuelles. M. Roux a cherché à appliquer le principe de l'écran coloré, modifiant la coloration apparente de l'une des lampes, à la comparaison d'une lampe au tungstène à un tube au néon par l'emploi d'un écran de gélatine coloré au bichromate de potasse.

2° Etude des matériaux utilisés dans l'art de l'éclairage.

Cette étude avait été fort négligée pendant longtemps. On commence maintenant à comprendre l'intérêt que présente la connaissance des matériaux utilisés : facteur de réflexion diffuse des substances mates ; facteur de réflexion, d'absorption et de transmission des verres diffusants. A la réunion de Saranac Inn, MM. DZIOBEK, de la Reichsanstalt et WALDRAM de la General Electric Co, ont indiqué des méthodes de mesures appropriées. Tous ces procédés de mesure sont, du reste, basés sur les propriétés du lumenmètre diffusant. Nous devons signaler que

le Laboratoire Central d'Electricité s'est outillé pour ce genre de mesures.

3° *Emploi du photomètre à scintillation.*

Cet appareil avait été fort prôné aux Etats-Unis, et certains opérateurs semblaient le considérer comme donnant la solution du problème de la photométrie hétérochrome. Il semble qu'on soit revenu de cet engouement devant les difficultés d'emploi de cet appareil.

4° *Photométrie physique.*

Aux Etats-Unis, dans les laboratoires industriels (Electrical Testing Laboratory, General Electric Cy), on emploie beaucoup la cellule photoélectrique pour la photométrie.

Les cellules photoélectriques sont au coesium dans le vide et un écran convenable (Ecran Wraten K.) corrige la différence entre la sensibilité spectrale de la cellule et celle de l'œil.

Etant donnée la faiblesse du courant photoélectrique, il est nécessaire de l'amplifier au moyen de triodes. La cellule photoélectrique semble promettre une précision des mesures photométriques plus grande que celle que donne la photométrie visuelle. On estime que, tandis que celle-ci ne permet qu'une précision de l'ordre de 1 pour cent, la cellule photoélectrique permettrait d'obtenir le millième. En réalité, les difficultés d'emploi de la cellule photoélectrique, peuvent entraîner à de graves causes d'erreur qui, si toutes les précautions nécessaires ne sont pas prises, rendraient illusoire la précision apparente. Jusqu'ici l'emploi de la cellule photoélectrique est resté confiné dans les laboratoires industriels. Comme nous l'avons dit, les établissements américains en font un grand usage, mais les laboratoires de précision, même les laboratoires officiels des Etats-Unis ne l'utilisent pas et se sont bornés à quelques recherches à ce sujet.

Nous devons toutefois signaler que le National Physical Laboratory, a utilisé un procédé pour amener deux lampes à la même température de coloration basé sur l'emploi de deux cellules, une au potassium, l'autre au rubidium (1).

(1) Depuis la rédaction de ce rapport nous avons appris que le National Physical Laboratory commençait à employer les cellules photoélectriques et qu'en particulier, il les avait utilisées pour étudier des lampes que lui avait envoyées le Laboratoire Central d'Electricité.

Signalons, pour terminer, que la General Electric anglaise, construit des cellules sensibles dans le rouge. Nous n'avons pas de renseignements précis sur la nature de ces cellules. Il semble que la nature de la substance sur laquelle est effectué le dépôt de métal alcalin, joue un grand rôle sur les propriétés de la cellule (Voir M. CAMPBELL, *Philosophical Magazine*, octobre 1928).

Annexe : Résultats comparatifs de flux lumineux.

Les mesures dont il va être fait mention ont été entreprises pour comparer les déterminations de flux lumineux au lumenmètre diffusant, faites au Laboratoire Central d'Electricité d'une part, au Bureau of Standards, à la Physikalisch technische Reichsanstalt, et au National Physical Laboratory, d'autre part.

Comme point de départ pour les mesures de flux lumineux au lumenmètre diffusant, le Laboratoire Central d'Electricité utilise un certain nombre de lampes à atmosphère gazeuse de 300 watts à filament disposé en couronne. La détermination du flux lumineux de ces étalons a été faite au début de 1928 par intégration, la courbe d'intensité lumineuse ayant été tracée au moyen d'un appareil à miroir.

1° Bureau of Standards.

Le laboratoire a reçu, par l'intermédiaire de la Compagnie des lampes, 5 lampes à atmosphère gazeuse. Ces lampes, dont le facteur d'efficacité était de 15 à 18 lumens par watt, avaient fait l'objet d'un certificat du Bureau of Standards, délivré à l'International General Electric Company, repéré par l'indication « Test n° Tel. 50 477 » et daté du 9 juin 1927. Ces lampes se trouvaient au Laboratoire Central depuis novembre 1927, et n'avaient été essayées chacune qu'une fois pendant quelques minutes. La première de ces lampes avait son filament disposé en couronne ; pour les autres, il était disposé en ligne brisée.

Résultats.

Numéros	Lumens		Mesure L. C. E.
	B. S.	L. C. E.	Mesure B. S.
6035	3030	3170	1,045
6036	4800	5100	1,062
6037	5220	5470	1,047
6038	8960	9280	1,035
6039	8710	9130	1,047

Ce qui conduit, pour le rapport des unités lumens dans les deux Laboratoires, au résultat moyen.

$$\frac{\text{lumen B. S.}}{\text{lumen L. C. E.}} = 1,017$$

2° *Physikalisch technische Reichsanstalt.*

a) *Comparaison directe :*

Le laboratoire a reçu de la *Physikalisch technische Reichsanstalt*, 6 lampes à ampoule de verre opalin à atmosphère gazeuse. Ces lampes fonctionnaient sous une tension de 24 volts avec un facteur d'efficacité de l'ordre de 13 lumens par watt.

Marque de la lampe	Lumens		Mesure P. T. R.
	P. T. R.	L. C. E.	Mesure L. C. E.
3637b — 1927	550	506	1,086
3637c — 1927	563	513	1,096
3637d — 1927	577	534	1,080
3637e — 1927	587	544	1,077
3637f — 1927	579	538	1,076
3637g — 1927	575	532	1,080

On en déduit pour le rapport moyen de l'unité lumen dans les deux Laboratoires :

$$\frac{\text{lumen L. C. E.}}{\text{lumen Helmer}} = 1,082$$

alors que ce rapport devrait être théoriquement de 1,11.

b) *Comparaison indirecte.*

Cette comparaison a été faite au moyen de lampes à filament de tungstène dans le vide, filament disposé en cage d'écureuil.

Ces lampes appartenaient à la Chambre des Poids et Mesures de Leningrad, et avaient été étudiées à la *Physikalisch technische Reichsanstalt* avant de l'être au Laboratoire Central. Leur facteur d'efficacité était d'environ 7 lumens par watt.

Numéro de la lampe	Lumens		Mesure P. T. R.
	P. T. R.	L. C. E.	Mesure L. C. E.
IIB — 2 — 1	468	446	1,048
IIB — 2 — 2	467	445	1,050
IIB — 2 — 3	466	439	1,061
IIB — 2 — 4	470,6	449	1,046
IIB — 2 — 5	466,7	446	1,045
IIB — 2 — 6	467,2	449	1,041

d'où pour les lampes ayant le facteur d'efficacité envisagé

$$\frac{\text{lumen L. C. E.}}{\text{lumen Hefner}} = 1,048.$$

NOTA. — En même temps que ces mesures de flux, il avait été exécuté des mesures d'intensités lumineuses comparatives par l'intermédiaire de lampes appartenant également à la Chambre des Poids et Mesures de Leningrad.

Le résultat de ces mesures avait été le suivant :

$$\frac{\text{Bougie internationale L. C. E.}}{\text{Bougie Hefner}} = 1,136.$$

3° National Physical Laboratory.

Un certain nombre de lampes ont été envoyées par le Laboratoire Central d'Electricité au National Physical Laboratory. Ces lampes ont fait l'objet de mesures au Laboratoire Central avant leur envoi en Angleterre et après leur retour.

A. — Lampes à atmosphère gazeuse, ayant un facteur d'efficacité compris entre 15 et 16 lumens.

Marque de la lampe	Lumens		L. C. E. après
	L. C. E. avant	N. P. L.	
Φ3	4070	4000	4105
Φ7	4040	3995	4095

En prenant pour valeur du flux la moyenne des deux valeurs mentionnées ci-dessus on trouve :

$$\frac{\text{lumen N. P. L.}}{\text{lumen L. C. E.}} = 1,0198.$$

B. — Lampes à atmosphère gazeuse ayant un facteur d'efficacité d'environ 11 lumens par watt.

Marque de la lampe	Lumens		L. C. E. après
	L. C. E. avant	N. P. L.	
B41	451	429	454
B42	462	437	461
B44	452	428	454
B45	458	434	458

d'où :

$$\frac{\text{lumen N. P. L.}}{\text{lumen L. C. E.}} = 1,053.$$

C. — Lampes à filament droit en cage d'écurcuil dans le vile, facteur d'efficacité 9 lumens par watt environ.

Marque de la lampe	Lumens		L. C. E. après
	L. C. E. avant	N. P. L.	
AL1	208	192,4	205
AL2	208	194,2	208
AL3	210	195,6	210
AL4	210	197,0	213

d'où pour les lampes de cette catégorie :

$$\frac{\text{lumen N. P. L.}}{\text{lumen L. C. E.}} = 1,073.$$

Conclusions. — Le rapport du lumen N. P. L. au lumen L. C. E. varie, avec le facteur d'efficacité de la lampe, de 2 pour cent pour les lampes de 15 lumens par watt, à 7 pour cent pour les lampes à 9 lumens par watt.

La comparaison entre les résultats du L. C. E. et du P. T. R. semblent conduire à des conclusions du même genre.

LES PROGRÈS DE L'OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

par le docteur Emile HAAS.

Considérations préliminaires sur la succession des parties dans l'acte de la vision : réfraction, impression, transmission, perception consciente. Impossibilité, en général, d'étudier séparément ces parties, en raison du fait que l'une débute avant que la précédente soit terminée. La conséquence est que l'on ne peut atteindre, ordinairement, que la cause initiale et l'effet final.

Travaux sur la réfraction (E. Haas ; Polack). Travaux sur le sens des formes (Dujour ; Dubar ; Nectoux). Travaux sur l'acuité visuelle aux basses lumières (Beyne et Worms ; Haas et Couvreur). Travaux de la catégorie psychologique (Frogé ; Pottevin et Faillie).

CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES.

Dans son rapport sur l'année 1927, le Dr Couvreur a dit que l'optique physiologique était une science « actuellement à peu près délaissée. » Je dirais plutôt qu'il est très difficile d'y faire actuellement des progrès, malgré le nombre des savants qui s'y intéressent.

Essayons, en effet, d'en délimiter le domaine. 1° L'optique physiologique comprend tout d'abord les phénomènes dioptriques dans le système centré de l'œil, et notamment de l'œil humain. Elle n'est, à ce point de vue, qu'une application de l'optique géométrique. Mais il s'agit d'une application particulièrement difficile, en raison de la structure du cristallin. Cette lentille n'est pas homogène, mais formée d'un nombre considérable de couches transparentes d'indice variable, vraisemblablement croissant de la périphérie vers le centre. Les mesures directes dans l'état de vie en sont quasiment impossibles, excepté pour les courbures des surfaces extrêmes. Les mesures sur le cristallin isolé de l'œil ne sont guère plus faciles, et comportent une grave cause d'erreur, du fait des altérations rapides de son tissu, lorsqu'il n'est plus plongé dans son milieu normal.

Personne, depuis Yung, Helmholtz, et Tscherning, dont le point de vue fut cependant plus limité, n'ose maintenant s'attaquer à ces calculs, auxquels manquent, à la base, des mesures d'une rigueur certaine.

L'optique physiologique étudie ensuite les causes de la variation de

pouvoir du système centré oculaire, chez le sujet vivant, c'est-à-dire l'accommodation. A cet égard, elle emprunte ses moyens à l'anatomie, à la mécanique, à la physiologie, et les résultats acquis grâce aux travaux de Tscherning présentent une grande vraisemblance. Mais nous pouvons regretter que des expériences sur la durée de l'acte accommodatif manquent encore, bien qu'elles apparaissent *a priori* comme possibles avec les moyens actuels.

2° Après l'étude de la *réfraction* dans le système centré oculaire, laquelle conditionne la formation des images représentatives du monde extérieur, l'optique physiologique étudie les phénomènes de l'*impression*. On entend par ce mot l'ensemble des modifications qui se produisent dans les cellules visuelles de l'écran rétinien (cônes et bâtonnets), au contact de la lumière. Cela exige la connaissance des propriétés des corps photosensibles, qui n'existent qu'en minimes quantités dans la rétine vivante, et sont rapidement altérables par la mort.

L'impression entraîne de plus des réactions proprement cellulaires et des réactions nerveuses, qui conditionnent respectivement la migration du pigment épithélial et les réflexes photomoteurs de l'iris, régulateurs de la quantité d'impression.

Avec l'étude de l'impression commence l'optique physiologique proprement dite. On comprend à quel ensemble de connaissances variées et difficiles se heurte d'emblée son étude.

3° Les phénomènes de l'impression resteraient inutiles à l'être vivant, s'il n'existait une transmission par les fibres, les cellules, et les relais nerveux. Cette *transmission* constitue la troisième partie de l'optique physiologique et se rattache à la physiologie des nerfs.

4° Enfin l'impression transmise détermine l'ébranlement des centres nerveux supérieurs de la vision, ainsi que des centres associés, ébranlement dont le résultat est la *perception consciente*. Il en résulte que la perception consciente, avec ses rétablissements et ses erreurs, constitue la quatrième partie de l'optique physiologique, qui relève ainsi de la physiologie des centres supérieurs, ou, si l'on préfère, de la psychologie.

Aucun de ces phénomènes, rangés sous les rubriques : réfraction, impression, transmission, perception consciente, n'est rigoureusement instantané. Notamment, les durées de l'impression, de la transmission, de la perception, sont insuffisamment connues. De plus, chacun de

ces phénomènes commence avant que le précédent ne soit terminé, d'où la difficulté de les isoler les uns des autres.

Dans l'état actuel de la science, les études d'optique physiologique ne peuvent donc pas se classer selon les quatre catégories que leur imposerait la logique, mais sous des catégories artificielles telles que réfraction, sens lumineux, sens chromatique, sens des formes, sens du relief. Les phénomènes rangés dans chacune de ces catégories artificielles ressortissent chacun à plusieurs des catégories logiques, mais il est le plus souvent impossible d'en faire une analyse complète, et l'observateur doit alors se contenter d'en enregistrer la cause initiale et l'effet final. Il est, en outre, souhaitable d'établir, chaque fois que faire se peut, une relation quantitative entre la cause et l'effet, sous la forme d'une des fonctions que le langage mathématique met à notre disposition.

Mais le lecteur attentif ne doit pas se dissimuler ce que de telles expressions ont parfois de chimérique. S'il est, en effet, généralement possible de donner une bonne mesure de l'excitant, qui est une grandeur physique choisie comme variable indépendante, il est toujours difficile, sinon impossible, de mesurer l'effet physiologique qui constitue la variable dépendante. Aussi ne faut-il considérer la plupart des formules de l'optique physiologique que comme des approximations très grossières.

Nous ne serons pas surpris, après ce qui vient d'être dit, qu'aucune véritable nouveauté n'ait paru, en 1928, sur des sujets aussi difficiles. Les travailleurs habituels de l'optique physiologique se sont contentés de perfectionner et de préciser les points déjà acquis, se cantonnant généralement à des objets modestes et bien limités.

1. — TRAVAUX RELATIFS A LA RÉFRACTION DE L'ŒIL HUMAIN.

Le Dr Emile HAAS a donné un mode de calcul particulièrement simple et direct pour connaître la grandeur des images rétinienne d'un objet éloigné, vu du point principal-objet de l'œil sous un angle connu, par un œil amétrope exactement corrigé par un verre de puissance connue. Cela revient à exprimer la grandeur des images rétinienne en fonction de la distance du plan principal-image du verre au plan principal-objet de l'œil, puisque la puissance du verre est liée à la distance ci-dessus désignée.

Les formules établies, que l'on trouvera dans la 6^e leçon du Dr HAAS (*Bulletin de l'Union Centrale des opticiens de France*, avril 1928),

permettent en outre de prévoir la grandeur de la déformation chez les astigmatés corrigés, et de définir les systèmes optiques propres à rendre cette déformation minimum.

Ce travail se rattache étroitement à la question du pouvoir séparateur de la rétine, car ses résultats permettent d'effectuer les corrections nécessaires aux mesures d'acuité prises chez les sujets munis d'un verre correcteur.

Il semble fort utile de revenir sur les travaux du Dr Polack, dont l'origine est bien antérieure à 1928, mais dont l'importance est considérable. Ces travaux ont un fondement géométrique, avec de nombreuses applications physiologiques. S'appuyant sur des expériences classiques et sur des expériences personnelles, le Dr Polack a montré que l'œil ne corrige pas son aberration chromatique. Il est donc astreint à mettre au point, c'est-à-dire à accommoder, sur l'une seulement des couleurs du spectre, lorsqu'il considère un objet blanc, et les expériences montrent que la couleur automatiquement choisie est le jaune. Il en résulte que les images rétinienne d'un objet blanc sur lequel on accommode sont bordées d'un liséré jaune clair avec un halo bleu foncé, tandis que les images des objets sur lesquels on n'accommode pas, outre qu'elles sont floues, sont bordées d'un bord orange avec halo bleu cyané, ou d'un bord verdâtre avec halo pourpre suivant que l'objet est plus éloigné de l'œil ou moins éloigné de l'œil que celui sur lequel il accommode.

Aucun de ces lisérés n'est consciemment perçu si l'on n'introduit aucun artifice, et cela s'explique par le phénomène dit de neutralisation, dont on retrouve d'autres exemples dans la physiologie de la vision. Et cependant ces lisérés sont inconsciemment perçus, et ce sont eux qui, d'après Polack, joueraient normalement le rôle d'excitant de l'accommodation, permettant au muscle ciliaire d'accomplir sans hésitation son action positive ou négative, lorsque l'œil veut se fixer sur un plan différent en profondeur de celui sur lequel il était précédemment mis au point.

Lorsqu'on photographie sur plaque autochrome, à l'aide d'un objectif non corrigé de son aberration chromatique, ou mieux à l'aide d'un objectif hyperchromatique (à aberration accrue), une série de plans de l'espace, après avoir mis au point sur le jaune d'un plan moyen, on réalise sur la plaque les lisérés de couleur dans l'ordre même où ils se produisent normalement sur la rétine. Ces lisérés ne choquent pas, et, si la plaque est examinée ou projetée dans des conditions convenables,

l'esprit en fait même abstraction plus ou moins totale. De plus, grâce à un phénomène subconscient qui reproduit celui de la vision naturelle, les lisérés de couleurs contribuent vivement à donner la sensation du relief, même à l'observateur n'utilisant qu'un seul œil.

Le Dr Polack a d'ailleurs montré que beaucoup de peintres usaient instinctivement des lisérés colorés, et il a établi des règles propres à les guider systématiquement pour obtenir, à l'aide d'une représentation plane, la sensation du relief.

II. — TRAVAUX RELATIFS AU SENS DES FORMES.

Le Pr Marcel DUFOUR, de Nancy, est revenu, à la Société d'Ophthalmologie de l'Est de la France, sur la question des tests d'acuité visuelle. Il déconseille l'emploi des lettres et des chiffres, afin d'éliminer le facteur psychologique spécial au sujet examiné, et recommande de préférence l'emploi du test théorique formé de deux points, ou, à défaut, les optotypes de E. Landolt à anneaux brisés.

Relativement à la graduation des tests, il expose les avantages respectifs de la progression arithmétique et de la progression géométrique, semblant conclure plutôt en faveur de la première.

Le Dr DUBAR a présenté une nouvelle échelle de caractères typographiques pour la mesure de l'acuité, dans laquelle le rapport des angles sous lesquels sont vus les interjambages des caractères appartenant à des lignes consécutives est constant.

M. NECTROUX, ingénieur à la Société des Lunetiers, a présenté une autre échelle typographique comprenant dix-huit degrés, dans laquelle la progression est encore différente.

Nous avons donc, plus que jamais, le choix entre un grand nombre de tests pour les mesures d'acuité. J'estime, à la vérité, que ce choix n'a pas la moindre importance pour la pratique ophtalmologique, mais il est possible que tel de ces types puisse rendre un meilleur service que tel autre, pour des emplois particuliers.

III. — TRAVAUX SUR L'ACUITÉ VISUELLE AUX BASSES LUMIÈRES.

Complétant leur travail de 1926, MM. le Dr BEYNE et le Pr WORMS ont fait au Congrès de la Société Française d'ophtalmologie, en 1928, une importante communication sur « la vision nocturne, ses éléments d'appréciation chez l'homme, et sa portée chez l'aviateur. »

Par une nuit claire, mais sans lune, correspondant cependant à la possibilité d'un bon travail aérien, les auteurs ont mesuré l'acuité visuelle de trois sujets normaux, et l'ont trouvée être de l'ordre de 6 à 7 centièmes de l'unité normale. Ceci fait, ils ont cherché en laboratoire quel était l'éclairement qu'il fallait réaliser sur les tests pour reproduire des acuités analogues, et l'ont trouvé de l'ordre de 15 dix-millièmes de lux.

Ces auteurs ont ensuite montré : 1° que, dans ces conditions tout au moins, l'acuité visuelle reste une fonction des cônes, comme aux hautes lumières ; 2° que cette acuité varie néanmoins en fonction du temps d'adaptation ; 3° qu'elle varie en raison inverse de l'âge des sujets examinés ; 4° qu'il est resté impossible d'énoncer une relation quelque peu constante entre l'acuité diurne et l'acuité nocturne d'un même sujet. 5° Ils ont enfin étudié les variations de l'acuité, lorsque l'éclairement du test s'écarte, en plus ou en moins, des 15 dix-millièmes de lux employés dans les précédentes expériences.

Il est intéressant de rapprocher ce travail de l'étude faite, par Emile HAAS et Jacques COUVREUX, de l'acuité visuelle aux basses lumières, postérieurement d'ailleurs aux premières recherches de MM. BEYNE et WORMS. L'objet principal de notre soin avait été d'exprimer les variations d'acuité, non en fonction des éclairagements, mais en fonction des brillances, et de faire varier ces brillances de façon parfaitement connue.

Ce résultat est dû au dispositif que j'avais imaginé antérieurement, pour mes recherches sur la sensibilité différentielle successive en lumière blanche (E. Haas, Comptes rendus de l'Académie des sciences, 10 mai 1926). Une première lentille conjugué le plan du filament rectiligne d'une lampe Cotton au plan d'une fente variable. Une seconde lentille conjugué à l'écran porteur du test celle des faces de la première lentille qui est du côté de la lumière. Dans ces conditions, et pourvu que les ouvertures des lentilles et la largeur maxima de la fente soient convenablement calculées, l'éclairement de l'écran est uniforme, et proportionnel à une longueur (celle de la portion d'image réelle du filament limitée par les bords de la fente).

Ce dispositif me semble pouvoir rendre encore des services pour une grande variété de recherches à venir. Notamment, en faisant tourner dans le plan de la fente des cames de profils variés, dont les bords empiètent sur la fente pendant la rotation, on peut réaliser toutes les formes possibles de variation de l'excitant lumineux en fonction du temps, et cela avec la plus grande précision.

IV. — TRAVAUX DE LA CATÉGORIE PSYCHOLOGIQUE.

Le docteur FROGÉ, d'Amiens, a présenté au Congrès de 1928 de la Société Française d'Ophthalmologie un intéressant travail sur la « lisibilité en fonction de l'espace et du temps ».

Toutes conditions égales d'ailleurs, la meilleure couleur à donner aux caractères que l'on veut faire lire à distance est le jaune sur fond bleu.

Javal a montré autrefois que, dans la lecture, nous fixons toujours le haut des lettres, et le bas est deviné. Frogé tire de là que la hauteur des caractères n'a pas grande importance, mais que les éléments caractéristiques d'un caractère doivent être placés à sa partie supérieure. Les caractères devront, en outre, être aussi éloignés l'un de l'autre que possible. Les recommandations précédentes étant relatives à la distance, l'auteur examine ensuite les circonstances propres à abréger la durée de reconnaissance.

La vitesse de lecture n'est, pour lui, dépendante ni de la couleur, ni de l'espacement des caractères, mais uniquement de l'aspect usuel du mot (toutes autres conditions étant égales d'ailleurs). Pour cette raison psychologique, il faut employer les caractères minuscules, auxquels nous sommes accoutumés par l'exercice de la lecture.

MM. Henri POTTEVIN et Robert FAILLIE, dans une note à l'Académie des Sciences, du 12 mars 1928, étudient la variation du temps de réaction psycho-motrice visuelle, en fonction de l'éclairement. Sous différents éclairagements, le sujet contemple l'aiguille immobile du chronoscope de d'Arsonval, et doit actionner une manette dès que l'aiguille se met en mouvement.

Avec de faibles éclairagements, le temps de réaction est long. Il est de 32 centièmes de seconde sous 0,7 lux. Il décroît régulièrement quand l'éclairement croît, et cela jusque vers 30 lux. Il est alors de 20 centièmes de seconde. Pour des éclairagements plus grands, il ne décroît plus que de façon insensible, atteignant seulement 19 centièmes de seconde sous 140 lux.

Il est permis de penser que, si les auteurs avaient fait un grand nombre de déterminations *consécutives* des temps de réaction propres à chacun des éclairagements, les résultats auraient été plus démonstratifs. Ce qui importe, en effet, en ces matières, est plutôt la série des courbes de fatigue respectivement propres à un éclairage donné, que la courbe des temps de réaction psycho-motrice en fonction de l'éclairement.

Remarquons que la décroissance de la vitesse de lecture, des vitesses de réaction psycho-motrice, et du rendement industriel, lorsque l'éclairement est cependant suffisant pour donner une acuité voisine de l'unité, doit être nécessairement considérée comme un test de fatigue cérébrale, et non pas strictement oculaire; autrement dit, c'est l'appareil nerveux de la vision, et l'appareil nerveux en général qui se fatigue, mais non point la rétine.

De même, on se souvient que l'acuité visuelle, et même le sens lumineux brut, sont doubles en vision binoculaire de ce qu'ils sont en vision monoculaire: le fait est très remarquable pour un physiologiste, car on n'imagine pas que l'association des sensations propres à chaque œil puisse se faire autrement qu'au niveau des centres nerveux supérieurs, et le mécanisme de cette association soulève des problèmes particuliers.

Il n'y a pas que l'œil à considérer dans la vision, mais tout un processus cérébral dont l'importance est considérable. Cette considération justifie la méthode psychologique, telle que l'a employée autrefois André BROCA avec ses collaborateurs MM. LAPORTE et JOUAUST, telle que l'ont employée MM. POTTEVIN et FAILLIE, et telle que l'emploie instinctivement tout chef d'industrie attentif aux éléments de son rendement.

L'ÉCLAIRAGE DES STUDIOS ET SES PERFECTIONNEMENTS EN 1928

par M. G. CABET

L'article résume les réponses qu'il a reçues à une enquête ouverte parmi les utilisateurs et les producteurs d'éclairage dans les studios.

Il en dégage la conclusion que, sauf dans des cas particuliers, l'emploi des lampes à incandescence survoltées tend à se substituer à celui des lampes à arc.

Afin d'établir notre rapport en toute connaissance de cause, nous avons questionné les utilisateurs et les producteurs des éclairages qui nous intéressent.

Pour chaque cas d'espèce, nous citerons une opinion et des remarques typiques :

Les Etablissements GAUMONT possèdent et mettent à la disposition des utilisateurs, tous les procédés d'éclairage usités en photo-cinématographie :

L'éclairage à arc ordinaire (blanc);

- arc à flamme minéralisée (jaune);
- arc à vapeur de mercure;
- arc à mercure corrigé par lampes incandescence;
- lampes à incandescence seules.

La direction de ces Etablissements nous indique d'ailleurs que l'emploi des lampes à incandescence lui paraît désirable et qu'elle « verrait avec plaisir ce mode d'éclairage se développer, à cause de sa commodité, de sa propreté, et surtout de son silence indispensable dans le cas des films parlants ou sonores ». Mais elle se plaint de la « grande consommation d'énergie électrique par rapport aux arcs, pour des éclairagements équivalents, de la trop grande part d'énergie dépensée en chaleur, ce qui parfois provoque de grosses difficultés de prises de vues ».

Nous croyons pouvoir indiquer que l'emploi de lampes à haut rendement diminuerait très sensiblement ces causes de gêne et de dépense.

M. GUY-GRAND croit que l'éclairage par lampes à incandescence à

atmosphère gazeuse est seul appelé à subsister en raison de l'économie qu'il procure par la suppression des commutatrices et l'abaissement de la tension (donc de la consommation) pendant les préparatifs de prises de vues et aussi parce qu'il est le seul possible pour l'enregistrement simultané des sons.

Il suggère l'emploi obligatoire de lampes en verre opalescent, afin de supprimer l'éblouissement et se plaint de la chaleur développée par les lampes.

Nous dirons que l'emploi de lampes à verre laiteux est la cause d'un mauvais rendement lumineux, puisqu'une notable partie de la lumière est arrêtée par les parois du ballon qui la transforment en chaleur. Cette même chaleur, due à l'effet absorbant des parois semi-opaques, empêche de pousser industriellement la température du filament, sous peine d'abréger la vie de la lampe, à une aussi haute limite que celle que l'on peut atteindre pour des filaments inclus en verreries claires ; il en résulte que l'émission lumineuse n'a pas la même composition spectrale, ce qui affecte le rendu des couleurs photographiées et, diminuant le rendement électro-lumineux des lampes, accroît la consommation électrique et la chaleur développée pour obtenir un effet photographique déterminé.

Nous préconisons plutôt, pour éviter la sensation d'éblouissement, la fragmentation de la puissance lumineuse par l'emploi de petites lampes à verrerie claire consommant de 150 à 250 watts par unité, équipées chacune dans un réflecteur-projecteur à ventilation naturelle, groupées en panneaux n'offrant que peu de solutions de continuité, ce, afin d'éviter que la juxtaposition des zones brillantes et obscures ne cause de l'éblouissement.

Nous ajouterons que ces lampes de petite puissance, ont une meilleure « tenue industrielle » que de plus grosses ; que l'équipement mécanique, électrique et optique en est plus aisé, que la répartition de la lumière sur le sujet est plus uniforme et sans dureté : les flux lumineux de chaque lampe, étant mi-projetés, mi-diffusés, se recoupent les uns les autres et la portée de la lumière est accrue, sans cependant qu'il y ait d'ombres accusées.

On peut, à la rigueur, masquer à la vue le filament incandescent par une calotte argentée, soit concave ou de préférence convexe, qui renvoie la lumière normalement diffusée sur le projecteur secondaire qui la renvoie sur le sujet, en la répartissant suivant sa courbe propre, mais il est certain que ces réflexions ne vont pas sans absorptions sélectives et pertes de flux.

Les directeurs des STUDIOS DE BILLANCOURT ont été des premiers, sinon les premiers, à employer l'éclairage par lampes à incandescence à haut rendement pour des prises de vues dites « au ralenti », c'est-à-dire opérées à très grande vitesse, où des éléments multiples et variables étaient à coordonner ; mouvements, couleurs, rapports de dimensions, valeur des contre-jours.

Après une mise au point d'ensemble, facilitée par la constance de la lumière, de bons résultats artistiques, techniques et industriels furent obtenus dès 1925.

Naturellement, l'équipement de ces studios a été continué dans cette voie ; en conséquence, les arcs en tube à vapeur de mercure ont été plus délaissés que les arcs à charbon, dont on tire parti en brûlant des électrodes en agglomérés minéralisés ou métallisés ; celles-ci sont sensiblement plus fumigènes que celles en graphite pur, mais elles permettent un meilleur rendu des couleurs.

Bien que des essais aient été faits pour établir de bons projecteurs à incandescence, destinés à remplacer les projecteurs à arc, les possibilités de fabrication des lampes ont limité les résultats pratiques à des unités consommant environ 3 kW concurrençant des arcs d'une consommation plus que double.

Il appartient donc aux constructeurs de lampes de fournir des appareils pouvant rivaliser avec les foyers à arc de 15, 40 et même 60 kW que les studios réclament.

Nous observons qu'un article du traité de paix ayant interdit chez nos ex-adversaires, la fabrication de grands miroirs optiques, ceux-ci ont aussitôt cherché et trouvé un succédané satisfaisant à leurs besoins ; ce fut le miroir à facettes qui, si son rendement n'égale pas celui du miroir optique, présente du moins des avantages caractéristiques surtout sensibles dans le cas de lampes à incandescence.

L'image du filament n'est pas reproduite par un tel miroir comme elle l'est avec un miroir plan ; les images données par chacune des facettes s'enchevêtrent et se confondent en donnant un faisceau très homogène, d'autant plus dénué de mouchetis que la surface du plan incandescent est plus grande par rapport à ces facettes.

Ainsi, on peut concevoir que, partant de tels projecteurs qui, actuellement, donnent satisfaction au point de vue optique, on en pourra construire de plus puissants, nécessairement de plus grand diamètre, sans beaucoup accroître le nombre des facettes dont la surface seule grandira, de même que la surface du plan incandescent générateur de

lumière. C'est une possibilité d'économie de prix de fabrication.

Enfin, la chaleur de la flamme de l'arc, cause fréquente de détérioration des miroirs, n'étant plus à redouter, on pourra faire des miroirs à plus court foyer que ceux usités actuellement et donner aux projecteurs des incidences sur l'horizontale qui, pratiquement, n'étaient pas sans risques pour la conservation des miroirs.

Nous observons que les lampes de très grande puissance, à employer dans de tels ensembles et dont la construction est difficile, peuvent être portées à une température moins élevée que les petites lampes destinées aux éclairages d'ambiance, sans que le rendu chromatique de la photographie en soit affecté. Ce, en raison de l'effet sélectif de couleur des miroirs de réflexion.

Les appareils construits donnent une excellente lumière dite « de direction », aussi largement épanouie qu'on peut le désirer pratiquement et permettent ainsi l'éclairage des sujets avec un faible recul sans crainte de provoquer des brûlures par « coup de soleil électrique ».

Naturellement, l'interposition d'un panneau de verre réfracteur dans le faisceau lumineux, peut faire diverger celui-ci et en modifier la forme, suivant les besoins.

Certains petits appareils, de puissance voisine de 1 kW, ont même été construits pour fonctionner normalement ainsi ; en ce cas, le petit miroir primaire est supprimé et on peut employer, comme seul réflecteur, un miroir optique sans se soucier de l'image du filament ; celle-ci est en effet supprimée par la porte mobile réfractante qui modifie, par réglage de la mise au foyer, la forme de la section du faisceau depuis la forme approximativement carrée jusqu'au rectangle filiforme.

Les projecteurs à condensateurs ou lentilles sont de moins en moins employés pour l'éclairage des prises de vues, ces verreries optiques étant lourdes et coûteuses et absorbant beaucoup de lumière.

M. GRILLOT DE GIVRY, qui a eu maintes fois à s'occuper des infiniment petits pour des travaux de micro-cinématographie, a rencontré de grandes difficultés pour faire passer un flux lumineux extrêmement intense par le tube d'un microscope et éclairer brillamment les microbes-sujets en s'efforçant de ne les détruire que le moins vite possible.

La question de concentration et de direction de la lumière est d'ordre purement optique et les travaux de M. Paul HELBRONNER, lors des travaux de géodésie entre la côte niçoise et la Corse, sont une splendide illustration de ce que l'on peut obtenir avec de simples lampes de projection à incandescence de quelques centaines de watts, mais employées

dans d'excellents systèmes optiques, par rapport à l'emploi de projecteurs de dizaines de kilowatts, forcément moins maniables.

Pour éviter la destruction trop rapide des microbes-sujets, nous pensons qu'il vaut mieux, en général, employer une lumière riche en radiations rouges, que riche en radiations violettes; s'il y avait encore un excédent nuisible de ces dernières, on pourrait essayer d'un écran à l'esculine.

Les lampes à incandescence étant mises en fonctionnement instantanément, on évitera, en les employant pendant le temps strictement nécessaire, de tuer les microbes à cinéphotographier.

Enfin, petit à petit, se perfectionne une pellicule à émulsion de sensibilité panchromatique hypersensibilisée qui, pour ces travaux spéciaux et délicats est tout à fait recommandable, car elle permet à la fois l'enregistrement correct de la couleur et la réduction de moitié ou des deux tiers de l'éclairement.

Le directeur du STUDIO ALEX NALPAS a remplacé sa récente installation d'éclairage par lampes à arc et tubes à vapeur de mercure par une installation complète en lampes à incandescence s'éclairant en deux temps; un coupleur sans résistance donne la demi-tension qui sert aux préliminaires de prise de vue, la pleine tension ne devant servir que pour celle-ci.

Seuls, quelques petits « spots » à lentilles servent à faire les contre-jours et à donner du relief aux sujets.

Ce studio, qui s'est fait une spécialité de films de modes, et où se tourne la présentation d'objets d'art délicatement colorés, a réalisé une économie de courant instantané de près de 50 pour cent sur sa précédente installation; on a aussi pu supprimer du personnel.

Grâce à la possibilité de fragmentation et de répartition des sources de lumière, ainsi qu'à leur constance d'éclat, on a pu réaliser d'intéressants travaux de truquages, mi-maquette très réduite, mi-sujets réels se raccordant parfaitement à la projection.

Des maisons de location de groupes électrogènes et de matériel d'éclairage pour prises de vues en déplacement, équipées jusqu'à ces temps avec des lampes à arc du type Bardon ou Jupiter, prévoient des équipements à incandescence pour satisfaire à la demande de leurs clients qui fréquemment travaillent dans des théâtres où la coloration dominante des décors et costumes est presque toujours en tons chauds et peuvent, en outre, vouloir réaliser des enregistrements sonores.

Dans un studio de Joinville, une installation réduite a été effectuée,

dont le fonctionnement a fait ressortir les inconvénients qui pouvaient résulter de la fourniture de courant à tension irrégulière et aussi de l'emploi, prolongé au delà des prévisions, des lampes à plein feu.

Il est à noter que les installations de distribution électrique et les centrales de studios s'éclairant à l'incandescence, exigent plus de soins et de surveillance que pour l'éclairage par arcs qui s'accommodent très bien de tensions fort variables, grâce à l'emploi des résistances-lampes.

Les vastes studios de la SOCIÉTÉ DES CINÉ-ROMANS, après des essais de divers matériels établis sur des données absolument différentes, ont modifié leurs anciens plafonniers à tubes de mercure, en leur adjoignant un nombre important de lampes à incandescence, puis ont acquis une certaine quantité de petits projecteurs à panneau divergent. Les essais se poursuivent actuellement, en vue de l'extension de l'emploi du matériel à incandescence qui convient tout spécialement aux éclairages pour prises de vues en couleurs.

Le studio de la SOCIÉTÉ DU FILM EN COULEURS KELLER-DORIAN, n'a guère subi de modification depuis son origine.

Il offre le type de la plus formidable concentration de lumière qui ait été réalisée sur une surface utile donnée. Les lampes employées sont de 2 à 2,5 kW. 300 kilowatts sont utilisables directement, fournis en courant alternatif sous 220 V ; des transformateurs à couplages variables, montés en série sur la ligne d'alimentation, permettent le réglage de la tension suivant les besoins. Toutes les commandes se font à distance et l'opérateur peut travailler sans aucun électricien.

La cabine de manœuvre mesure environ 9 m³ et le champ utile aux prises de vues 26 m² sur 3,50 m de hauteur.

L'aération est assurée par un ventilateur de 15 ch. C'est une installation type.

D'autres studios, font des essais plus ou moins personnels, notamment les STUDIOS RÉUNIS de la rue Francœur et d'Épinay, ainsi que celui des FILMS D'ART qui, sans doute par analogie avec la construction des portants de tubes à mercure, a constitué des portants lumineux en piquant un certain nombre de lampes devant un fond peint en blanc : la lumière ne porte pas très loin. C'est encore la période des tâtonnements.

Les studios de province sont encore plus en retard, même ceux en

projet. Restent les studios à but éducatif et technique. La SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHOTOGRAPHIE, société reconnue d'utilité publique, a réalisé un studio de démonstration pouvant marcher directement à 110 ou 220 V.

L'ÉCOLE TECHNIQUE DE PHOTOGRAPHIE ET DE CINÉMATOGRAPHIE est sur le point d'en réaliser un autre destiné à l'enseignement de ses élèves.

Quant aux photographes professionnels, surtout en province, ils sont lents à s'outiller et achètent souvent, surtout lorsqu'ils s'installent de toute pièce, de vieux matériel ou d'antiques cabines à magnésium...

Cela tient à ce que beaucoup de gens sans éducation préalable spéciale (l'École de photographie étant de création récente), s'improvisent photographes.

Leur choix n'est pas souvent très motivé et, de plus, le courant électrique permanent et abondant, fait parfois défaut.

Pourtant, à Paris, certains professionnels avertis, ayant eu en mains les premières lampes à incandescence dès 1913, ont liquidé leurs anciennes installations d'éclairage, pour ne s'éclairer qu'à l'incandescence sur courant alternatif.

Ils ont gagné et apprécié une bien meilleure qualité de travail ne nécessitant qu'un minimum de retouche, la composition de la lumière convenant exactement aux besoins des émulsions photographiques modernes.

Pour eux ont été créés de petits portants, herses et projecteurs de faible consommation, à lampes de puissance unitaire de 100 à 150 W, lampes d'ambiance éclairant complètement le sujet, donnant « les détails » ou la direction principale de lumière, sans ombres accusées; les projecteurs « d'effets » ou de relief absorbant de 150 à 500 W.

En outre, il leur est offert un matériel « portable » sous forme de valise réduite pour les éclairages au domicile des particuliers; ces appareils, d'un poids approximatif de 3 kg, peuvent fonctionner sur tous compteurs de 3 hW.

En ce qui concerne les travaux de photogravure, M. DEMICHEL, président de cette section à la Société Française de Photographie, a bien voulu nous faire part de ses réflexions.

Pour l'insolation simple des clichés, l'arc à feu est la source de lumière préférée en raison de l'affinité spéciale de l'émulsion, sensible surtout aux radiations bleu-violettes et aussi du temps prolongé de l'opération dont les lampes à haut rendement ne s'accommoderaient pas.

Pour les reproductions de documents et les sélections trichromes, il est fait usage, dans les ateliers de la maison DEMICHEL ET PLOQUIN, de lampes à incandescence de 2 kW environ, groupées par paires de chaque côté du châssis porte-document.

Ces lampes peuvent être alimentées sous trois tensions différentes, suivant la couleur de la sélection à opérer.

Ainsi on évite de produire des rayons que l'écran sélecteur arrêterait ensuite.

La difficulté est d'empêcher les points brillants des sources de lumière de se refléter sur la glace du châssis-presse ou sur les vernis ou laques des tableaux.

Des essais sont en cours pour l'emploi de lumière projetée, soit par de multiples petits projecteurs-rélecteurs, soit par de gros projecteurs à facettes ; il semble que ces derniers doivent donner plus de satisfaction, les surfaces à couvrir étant toujours réduites.

Voici donc passés en revue tous les cas typiques d'éclairage à usage photo-chimique, depuis les éclairages de 3 hW des photographes en déplacements, jusqu'à ceux de 3000 kW des STUDIOS DES FILMS DE FRANCE.

Voici maintenant le résumé d'opinions émises, au cours de diverses communications par les techniciens de la chimie photographique.

M. DIDIEE, ingénieur de la Société Pathé-Kodak à Paris dit, en parlant des conditions que doivent remplir les sources lumineuses à employer pour éclairages de prises de vues sur émulsions panchromatiques (1) :

« Les lampes à incandescence spéciales, à atmosphère gazeuse, sont seules capables de remplir facilement les conditions recherchées.

« Le photographe qui les emploie a déjà appris qu'elles sont aptes à lui donner deux sortes de lumière : à tension basse, excès de rouge ; à tension normale, proportion convenable pour le film panchromatique. Le spectrogramme nous montre que la lumière produite est riche en toutes radiations, bien réparties et en bonne proportion. C'est un aliment complet destiné tout naturellement à une émulsion de sensibilité complète. Le second point qui intéresse le photographe est la durée des lampes. Des systèmes particuliers de montage, permettent leur mise en fonctionnement au ralenti dans l'intervalle de la préparation des scènes, tandis que le fonctionnement à plein feu sera réservé pour la

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*. Tome VIII, 4^e série, octobre 1928, p. 1044.

durée de la scène elle-même. Il est à remarquer que, dans certains systèmes, la sous-tension a été établie de façon que la lumière corresponde très approximativement à la sensibilité de l'œil. Il serait, en effet, bien intéressant que le photographe puisse juger des effets quand la lumière fonctionne à basse tension, effets que les lampes fonctionnant à plein feu permettront de traduire sans distorsion sur la pellicule photographique. C'est sur ce dernier point qu'il serait bon que les électriciens portent toute leur attention ».

De même, MM. L.-A. JONES et J.-I. CRABTREE, ingénieurs aux Laboratoires de recherches de la Société Eastman Kodak, s'expriment ainsi au sujet du film panchromatique Eastman (1) :

Lampes à filaments de tungstène incandescents. — Jusqu'à présent, cette source de lumière n'a été que très peu utilisée en cinématographie, car elle est relativement pauvre en radiations actives sur le film cinématographique négatif Par Speed ou Super Speed (350 à 550 m μ), mais il est probable que l'emploi de plus en plus général du film panchromatique amènera à utiliser couramment la lampe à incandescence. La proportion considérable des radiations vertes, jaunes et rouges auxquelles est sensible le film panchromatique, rendent cette lampe extrêmement avantageuse.

Entre autres avantages de ces lampes, on peut signaler la propreté, l'absence de toutes fumées nocives, la facilité de manipulation, et le fait que, une fois mises en place, elles n'exigent plus aucune attention de la part des électriciens.

Avec 15 groupes, l'éclairage d'une scène de 12 m est suffisant pour obtenir des films normalement posés dans l'appareil de prise de vues en deux couleurs, avec objectifs ouverts à F. 3,5 et obturateurs ouverts à 180°, à la cadence normale de 16 images par seconde ; pour de plus petites scènes, on réduit proportionnellement le nombre des groupes.

Dans les mêmes conditions on obtient des films normalement posés pour cinématographie en noir, quand on utilise 3 groupes de chacun 3 lampes pour éclairer une scène de 6 m ; dans ces conditions, la chaleur n'est pas gênante et il n'y a pas à craindre d'éblouissement ; ce mode d'éclairage supporte avantageusement la comparaison avec les autres illuminants usuels.

(1) Extraits d'une conférence faite à la Société Américaine des Techniciens du cinématographe.

M. ABGRALL a exprimé dans un communiqué à la Presse, une opinion toute à la faveur de l'éclairage à l'incandescence. Il n'y aurait que sur le point de vue photographique que nous ne le suivrions pas.

M. MAURICE LERBLANC, directeur de la SOCIÉTÉ HEWITTIC, ainsi que la SOCIÉTÉ LA VERRERIE SCIENTIFIQUE, nous ont indiqué que l'on obtenait une bonne correction de la lumière des tubes au mercure par l'emploi simultané d'une certaine quantité de lampes à incandescence ordinaires.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Nous devons constater que, sans exception, tous les utilisateurs emploient ou tendent à employer les lampes à incandescence. Certes, on enregistre quelques tâtonnements, tant dans la construction du matériel que dans l'utilisation de celui-ci : cela tient à ce que peu de personnes sont à la fois aptes à construire et à utiliser, en fonction des exigences des théâtres, les prises de vues et les particularités des émulsions photographiques ; enfin, qu'un utilisateur bien au courant des nécessités photographiques, obtient parfois des résultats décevants pour avoir voulu construire, sans être au courant des lois de l'électricité, de la mécanique et de l'optique ou des possibilités d'emploi des lampes.

A ce point de vue, il est désirable que les électriciens de studios soient très vigilants et avertis qu'à une technique nouvelle ne correspondent pas toujours les usages anciens.

Cet engouement pour l'éclairage par l'incandescence provient, avant tout, de l'usage de plus en plus généralisé des nouvelles émulsions photographiques à sensibilité complètes dites panchromatiques, employées aussi bien pour la photographie ordinaire en blanc et noir que pour la photographie en couleurs.

Ce courant est encore accentué du fait de l'apparition industrielle toute récente des films parlants ou sonores qui ne tolèrent aucun bruit parasite lors de l'enregistrement.

Mais, en dehors de ces deux grandes raisons déterminantes, la commodité de manipulation, la propreté, l'absence de risque d'incendie, de brûlure des yeux, la fragmentation ou la concentration de puissance lumineuse soit par foyer, soit optiquement, la possibilité de modifier l'émission chromatique en fonction de la sensibilité relative d'émulsions diverses, l'instantanéité de l'allumage en toute circonstance, la légèreté du matériel et son bas prix de revient, font que très certainement cet

engouement n'est pas une simple mode, mais est imposé par le besoin et la logique.

La Société de LA LAMPE PHILIPS, présente deux types principaux de lampes : les lampes « Linéa » de forme tubulaire allongée, en cristal clair et à filament linéaire, donnent une lumière fort diffuse comparable à celle des tubes à vapeur de mercure ; elles sont établies pour 500 et 1 000 W ; en outre, une lampe « Photomirenta » de forme ballon, à col en verre opalescent et à miroir argenté, déposé à l'intérieur du ballon dont la lumière est bien diffusée par le cristal laiteux.

C'est une lampe qui paraît surtout destinée aux photographes ; sa puissance est de 500 W.

D'après les constructeurs qui ont bien obligeamment voulu nous renseigner, cette lampe se passe de toute armature.

En outre, sont présentées des lampes vitrine et des lampes projections bien connues et appréciées. La Société « Osa » met en vente des lampes dites « Vitraphot », lampes de projection bien construites.

La Société française de la LAMPE OSRAM, ainsi que la COMPAGNIE DES LAMPES, offrent un choix très étendu de lampes comparables comme rendement aux précédentes ; cette dernière Compagnie fait actuellement de très intéressantes recherches dans la voie de l'industrialisation des lampes à haut rendement.

Quant à la Société LUMIÈRE (lampes Néo Lux), elle s'est cantonnée dans la construction des lampes de types standardisés et de lampes anti-éblouissantes qui donnent toute satisfaction.

Une remarque générale est à faire : la presque totalité des lampes précitées, fonctionnent à une température un peu basse et donnent un excès de rouge.

Nous croyons savoir que l'on étudie une lampe à plusieurs filaments différents dont le mélange de lumière à l'allumage correspondrait aux diverses sensibilités des différentes marques d'émulsions.

Cependant, il se pourrait que d'ici quelque temps nous voyons d'autres procédés d'éclairage, que ceux jusqu'ici usités dans les studios, être proposés aux utilisateurs. Peut-être d'abord en qualité de compensateurs d'autres sources de lumière, incomplètes en radiations, puis si les progrès se confirment, comme foyers lumineux se suffisant à eux-mêmes et ayant un certain nombre des avantages qui, à ce jour, militent en faveur des lampes à incandescence. Je veux parler des tubes luminescents.

L'INDUSTRIE DES ENSEIGNES LUMINEUSES

par M. FONSEQUE

Enseigne « K. Ray ». — Enseignes multicolores en tubes au néon.

L'invention qui nous paraît être la plus intéressante à signaler dans le domaine de la publicité lumineuse pendant l'année 1928, est l'enseigne brevetée dite « K. RAY » qui résout ce problème difficile d'une manière très originale et absolument nouvelle.

On a cherché depuis longtemps le moyen d'éclairer uniformément

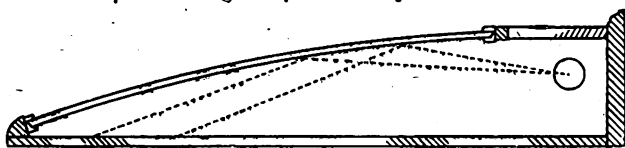


Fig. 1.

une surface d'une certaine dimension au moyen d'une rampe de lampes ou d'un encadrement de lampes. Les procédés jusqu'alors employés offraient l'inconvénient de présenter des zones de lumière vive à proximité des lampes et des zones d'ombres au centre.

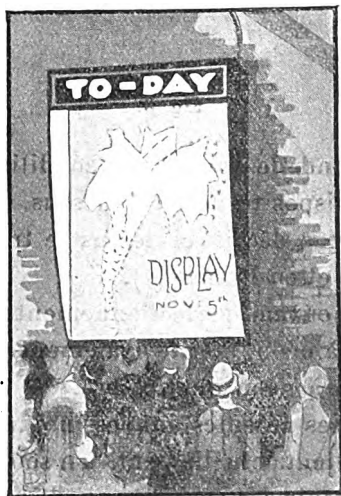


Fig. 2.

L'invention dont il s'agit est basée sur le phénomène de la réfraction. Le panneau à éclairer est recouvert d'un verre qui affecte un profil approprié (voir figures 1, 2, 3) ou toute autre forme, grâce à la

réflexion de la lumière des lampes sur la glace recouvrant l'enseigne, la surface se trouve éclairée d'une façon uniforme.

Le principe décrit ci-dessus permet l'éclairage de panneaux de très grandes dimensions jusqu'à $2,50 \times 2,50$ m et l'éclairage de bandeaux de magasin de toute nature : lettres dorées sur fond de marbre

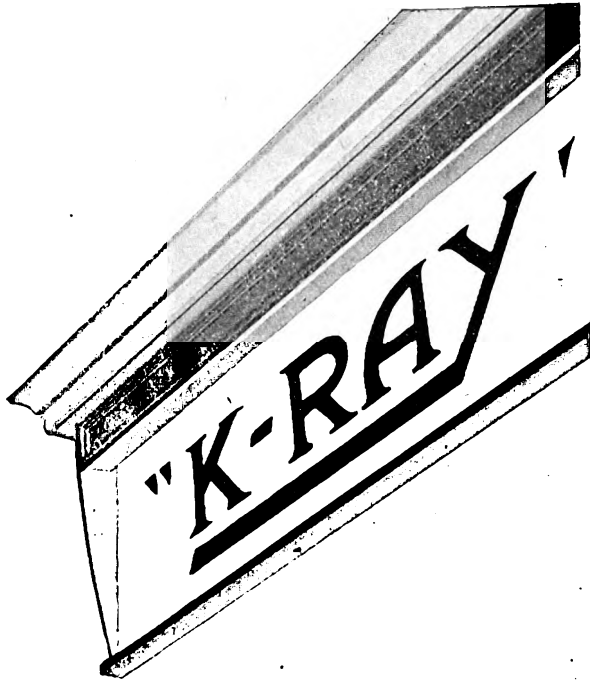


Fig. 3.

lettres de zinc sur fond de bois, à la condition que ces bandeaux soient recouverts du dispositif décrit ci-dessus.

L'enseigne « K. RAY » décrite ci-dessus se trouve protégée par des brevets en Angleterre et en France (1).

L'ingéniosité d'un nouveau perfectionnement apporté aux enseignes lumineuses des tubes à néon, mérite également d'être signalé ; il s'agit d'une enseigne en tube à néon multicolore.

M. CLAUDE a créé, ces récentes années, un tube cellulaire bicolore rouge et bleu. On parvient actuellement, en soudant des tubes de couleurs différentes, à obtenir des enseignes multicolores. Le tube constituant l'enseigne proprement dite est composé de cellules : bleu, rouge vert, qui donnent des effets originaux très attrayants.

(1) Nous devons les clichés ci-dessus reproduits à l'obligeance de M.-A. W. Beuttell, M. I. E. E.

BALISAGE NOCTURNE DES ITINÉRAIRES D'AVIONS.

par M. ABADIE, *Ingénieur des Arts et Manufactures.*

Nécessité du balisage nocturne. — Solution des phares puissants et distants et d'aérodromes de secours ; inconvénients. — Solution des phares nombreux et de faible puissance ; avantages. Choix de la couleur des feux. — Réalisation du jalonnement ; tubes au néon de Barbier-Bénard-Turenne et de l'Electro-luminescence ; avantages et inconvénients des tubes au néon ; leur mauvais facteur de puissance ; procédés d'amélioration. — Caractéristiques des tubes Barbier-Bénard-Turenne et Electro-luminescence. — Dispositions des phares et des manipulateurs de signaux. — Conclusions.

Nécessité du balisage. — Le balisage nocturne des itinéraires suivis par les avions, présente actuellement un intérêt aigu. En effet, il importe à l'avion, qui a la responsabilité de nombreuses vies humaines, de pouvoir, si sa marche se trouve entravée, connaître exactement l'endroit où il se trouve, afin d'atterrir dans des conditions de sécurité complète.

Il est donc nécessaire de disposer d'appareils lumineux, dotés d'une grande puissance de pénétration, pour indiquer au pilote ses coordonnées exactes. De ce besoin sont nées deux écoles de balisage.

1° L'école qui préconise l'emploi de phares puissants et distants de 150 à 200 km : cette école est sœur de celle qui préconise la création d'aérodromes de secours où l'avion sera à même d'atterrir sans risques.

Pour cette école, l'existence d'aérodromes de secours en connexion avec des phares espacés, présente l'avantage de donner à l'aviateur la sécurité d'atterrissage, de réapprovisionnement et de réparation, qui constitue pour la régularité du fonctionnement de la ligne, un facteur important. Les critiques que l'on peut faire à cette école sont importantes :

a La création d'aérodromes de secours contigus aux phares de jalonnement à grande puissance est onéreuse.

b Si, pour une raison quelconque, un des phares vient à s'arrêter,

(1) Présenté à la séance de la 2^e section de la Société Française des Electriciens, le 16 avril 1929.

il existera une zone de près de 400 kilomètres, dans laquelle l'avion privé de tout point de repère, pourra perdre sa direction.

Or, le balisage lumineux a pour principal objet de combattre l'effet d'isolement résultant pour l'aviateur de la brume à la surface du sol et il existe, à peu de distance les unes des autres, des zones où le brouillard est de densité très inégale.

De ce fait, l'existence d'un phare puissant peut devenir illusoire s'il se trouve placé dans une zone de brouillard intense ; quelle que soit sa puissance, l'avion ne pourra le voir, alors que si au contraire la même puissance était répartie en plusieurs phares, il y aurait beaucoup de chances pour que, si l'un des phares était dans le brouillard, l'autre se trouvât dans une zone plus claire.

2° La 2^e école, pour remédier aux inconvénients de la première, préconise une série de phares placés à courte distance (10 à 15 km) ; chacun d'eux muni d'un dispositif automatique signalisant son emplacement par une lettre de l'alphabet.

De ce fait, l'avion, même si en raison du brouillard, l'un des phares a échappé à son observation, aura beaucoup plus de chance de se repérer et de connaître exactement ses coordonnées.

Cette 2^e solution est actuellement préconisée par les services techniques de l'Aéronautique française, elle semble convenir le mieux au trafic régulier et permanent d'une ligne d'aviation commerciale.

Entre autres avantages, elle représente une moindre dépense que la solution 1^o.

En outre, son installation ne présente pas aujourd'hui de difficultés ; on dispose partout dans la campagne de courant électrique et il est facile de se brancher, soit sur une cabine de transformation, soit en un point élevé, un toit de ferme par exemple.

En complément de cette 2^e solution, on envisage de baliser de 5 km en 5 km, par des feux fixes peu coûteux, la ligne exacte que doit suivre l'avion.

Choix de la couleur des feux. — *A priori*, le choix d'un phare blanc se présente naturellement à l'esprit ; malheureusement, les feux blancs, surtout s'ils émettent des signaux morses, sont inopérants, en raison des nombreuses voitures automobiles qui circulent la nuit. Pour l'œil de l'aviateur, la lueur d'un phare blanc qui émet des signaux morses, se confond complètement avec les feux d'un des phares d'une automobile parcourant une route sinueuse. Il faut donc chercher une couleur

pour laquelle la rétine présente le maximum de sensibilité : le jaune ou le vert, dont le coefficient de sensibilité est 8 à la rétine, répondent le mieux à cette condition.

Mais on ne connaît pas de source convertissant toute l'énergie électrique en radiations jaunes vertes.

Si on place un verre filtrant devant une source blanche, le rendement est déplorable, le coefficient d'absorption de ces filtres variant de 70 à 80 pour cent. Le jaune vert est donc d'une réalisation difficile.

D'après une loi connue de l'optique, la diffraction est inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde ; donc, plus sa longueur d'onde sera grande, plus la lumière émise aura de pénétration pour la brume.

La source lumineuse contiendra des radiations très sensibles pour l'œil (jaunes) et des radiations rouges qui pénétreront le brouillard.

Expérimentalement, ce fait se vérifie, puisqu'une lumière blanche paraît à distance rouge dans le brouillard.

On est donc conduit logiquement à employer une source rouge orangée, source qui a son prototype dans le néon ou dans le mélange néon et hélium.

Pour faire fonctionner un tube au néon, il suffira de disposer d'un transformateur, d'une self inductance et d'une prise de courant quelconque.

Réalisation du jalonnement. : Les lignes Paris-Londres et Paris-Bruxelles ont été jalonnées de cette manière et sont actuellement en fonctionnement. Les postes sont installés à Verberie, Noyon, Inchy, Grez, Airaines, Arry.

En ce qui concerne l'emploi du tube au néon pour le jalonnement des routes aéronautiques, nous nous trouvons encore en présence de deux écoles, celle de BARBIER-BENARD-TURENNE, concessionnaires de PAZ ET SILVA et de GEORGES CLAUDE et celle de l'ELECTRO LUMINESCENCE.

La première préconise l'emploi de tubes de grande surface et de faible brillance ; la deuxième l'emploi de tubes de faible volume et de grande brillance.

L'expérience a prouvé que le tube diffusant, c'est-à-dire à large surface lumineuse, donne une meilleure visibilité que le tube quasi ponctuel ; les postes de BARBIER-BENARD-TURENNE, sont, en principe, constitués par des tubes en V accrochés sur un bâti de forme pyramidale. Les tubes de l'ELECTRO-LUMINESCENCE sont beaucoup plus courts (1 mètre environ) et il y circule des courants importants.

Au point de vue de la consommation, le tube au néon est intéressant si l'on compare la transformation de l'énergie électrique prise par le tube en énergie vibratoire jaune-rouge.

En effet, la consommation par mètre de tube au néon (abstraction faite des chutes cathodiques de potentiel) est de l'ordre de 0,4 W par bougie. La durée de vie des nouveaux tubes au néon peut atteindre plusieurs milliers d'heures.

Le coût de fabrication et d'installation de tubes au néon est bien supérieur à celui d'une lampe à incandescence; mais si l'on voulait obtenir, par une lampe à incandescence filtrée, des radiation jaunes-orangées et en admettant qu'elle ne consomme que 0,75 W par bougie (moyenne), il faudrait consommer environ 10 fois plus que dans un tube à néon.

Un second avantage du tube au néon est qu'il n'a pas d'inertie lumineuse; on peut donc lui faire émettre, à une vitesse quelconque, des signaux morses et même clignotants; ce qui permet de diminuer la consommation.

Au contraire, si l'on voulait faire émettre par une lampe à incandescence, une lumière pulsée à grand régime, on en serait empêché par l'inertie calorique du filament.

Un inconvénient grave du tube au néon consiste dans son très mauvais facteur de puissance, de l'ordre de 0,4 à 0,5. En effet, plus le diamètre du tube est grand, plus est grande la différence entre la tension d'ionisation du tube, c'est-à-dire la tension nécessaire à la déformation des atomes de gaz pour les rendre conducteurs et la tension de marche du tube.

C'est ainsi que, par exemple, pour un tube de 30 mm de diamètre, il faut compter environ 300 V par mètre pour l'ionisation, alors que, dès qu'il est ionisé, la tension tombe à 100 V par mètre. Donc, pendant chaque période du courant d'alimentation, le tube ne reste allumé que dans la partie supérieure et inférieure de la sinusoïde des différences de potentiel.

Ce facteur de puissance peut s'améliorer par l'emploi de capacités mises en série ou en dérivation sur le tube.

Une autre méthode consiste à utiliser, pour l'alimentation de ces tubes, des transformateurs construits de manière à développer, tout particulièrement, un harmonique de la tension secondaire jusqu'au triple de la tension de marche du tube; l'inconvénient de ce procédé est le coût du transformateur qui doit fonctionner sous très faible induction et qui a, de ce fait, une puissance apparente égale à trois ou quatre fois la puissance utilisée.

Pour améliorer le facteur de puissance, il vaut mieux utiliser des tubes de petit diamètre intérieur et de grande longueur.

Par exemple, les lampes tortillons, à diamètre intérieur de 7/9 mm et de 8 mètres de longueur de tube, construites par l'ELECTRO-LUMINESCENCE, permettent d'obtenir un facteur de puissance à 0,70 environ.

Ceci vient de ce que, dans le tube de 7/9, le diamètre virtuel de la colonne ionisée est supérieur au diamètre effectif du tube de verre et, qu'immédiatement, le tube plafonne.

Dans les campagnes, les secteurs peuvent se plaindre de cette diminution du facteur de puissance, qui entraîne un $\cos \varphi$ apparent déplorable.

Dans la pratique, la distribution dans les campagnes se faisant presque toujours en courant triphasé, les phares seront construits en sorte que les éléments au néon seront symétriquement groupés sur les phases.

Il faudra, comme nous le verrons par la suite, prévoir que si un élément s'arrête sur une phase, un autre élément se met automatiquement en marche afin de ne pas déséquilibrer la distribution.

Caractéristiques des tubes. — Les tubes au néon BARRIER-BÉNARD-TURENNE, sont constitués par des tubes de 20/22 mm en bout desquels sont placées des électrodes de dimensions correspondantes à celles utilisées dans les rampes de publicité construites par les Etablissements GEORGES CLAUDE de Boulogne, le diamètre des rampes étant de 30 mm. Le gradient de potentiel étant pratiquement inversement proportionnel au rayon tant que le débit dans le tube n'est pas suffisant pour que le diamètre de la colonne ionisée soit supérieur au diamètre intérieur du tube de verre, la quantité d'énergie électrique dépensée par mètre courant est plus élevée et, de ce fait, la brillance est plus forte.

Les électrodes sont constituées par des manchons en cuivre électrolytique de grande surface (1,25 dm minimum pour 1 A), en vue de pallier à l'effet d'absorption.

Elles présentent une chute cathodique de potentiel de l'ordre de 150 à 200 V.

Les tubes de l'ELECTRO-LUMINESCENCE sont de deux catégories :

1° Des tubes droits pouvant débiter plusieurs ampères, par suite de la constitution spéciale des électrodes.

2° Des tubes contournés en forme de cylindres en pyrex, diamètre intérieur 7/9, longueur développée 8 m, débit possible 400 mA.

3° Des tortillons en quartz beaucoup plus réduits comme dimensions et qui peuvent s'utiliser en les plaçant dans la zone focale des projecteurs.

Les tubes 1° peuvent être alimentés, ainsi que les tubes 2°, par des transformateurs, suivant la méthode classique.

Il existe un autre tube qui présente la particularité de permettre une signalisation facile avec un facteur de puissance du tube amélioré.

Pour cela, le tube est, suivant sa longueur, réuni aux bornes du transformateur, dont la tension secondaire est calculée en sorte qu'elle soit seulement de 20 pour cent supérieure à la tension de marche du tube ; si on établit cette différence de potentiel aux bornes du tube, il ne s'allume pas, parce que la tension n'est pas suffisante pour ioniser le gaz.

Le tube est muni d'une troisième électrode placée en son milieu et réunie à une source de haute fréquence (petits appareils MAXWELL ou STERLING).

Dès que l'on fait fonctionner la haute fréquence, le gaz est ionisé, le tube s'allume ; si on arrête la haute fréquence, le tube s'éteint car, étant donné la faible cohésion électrique du néon, le tube s'allume et s'éteint à chaque période du courant (application stroboscopique).

De ce fait, la manipulation de l'émission du courant pourra être provoquée pour un groupe de tubes par un simple appareil de haute fréquence. Le facteur de puissance se trouvera être amélioré et pourra remonter à 0,7 ou 0,8

Les électrodes des tubes de l'ELECTRO LLUMINESCENCE sont constituées par un métal donnant naissance à une tache cathodique sans que sa tension de vapeur soit susceptible d'étouffer le spectre du néon ; le cadmium semble réunir parfaitement ces conditions.

La chute cathodique de potentiel de ces électrodes est excessivement réduite, comparée aux électrodes en cuivre, par exemple à grande surface (tubes G. CLAUDE).

Dans les tubes à électrodes à tache cathodique, on pourra faire circuler des courants notables sans perte d'énergie énorme à l'électrode et en conservant des dimensions pratiquement utilisables.

Disposition des phares. — Les tubes au néon sont montés sur des bâtis métalliques, à l'extrémité de poteaux en béton armé, par exemple, et comportent deux armoires qui contiennent les appareils de manipulation.

L'armoire basse tension renferme l'interrupteur général, les fusibles

et les self-inductances de réglage du ou des transformateurs. L'armoire haute tension contient le manipulateur. Le manipulateur est, en principe, constitué par un appareil d'entraînement automatique (petit moteur électromagnétique, petit moteur à courants de Foucault) et une came profilée différemment suivant la lettre ou le signal à émettre, fait basculer des petits cochlons à mercure-hydrogène qui interrompent le courant.

Dans les appareils BARBIER-BÉNARD-TURENNE, le manipulateur est placé sur la basse tension et dans les appareils de l'ÉLECTRO-LUMINESCENCE sur la haute tension.

Conclusions. — En résumé, l'application des tubes au néon au balisage des routes d'aviation présente les avantages suivants :

1° transformation intégrale de l'énergie dépensée dans le tube, en énergie rouge orangé, c'est-à-dire pénétrante et visible;

2° souplesse parfaite pour l'émission des signaux (faible cohésion électrique du néon).

Elle présente les inconvénients suivants :

1° coût onéreux, par suite de la nécessité de transformer le courant ;

2° faible valeur du facteur de puissance.

Néanmoins, des efforts importants ont été accomplis dans leur construction, en vue de diminuer ces inconvénients et l'on peut dire que les phares de balisage par tubes au néon ne sont encore qu'à leur début et que chaque année il leur sera apporté des perfectionnements nouveaux, en vue de leur conserver la faveur des services de l'Aéronautique.

COMPTE RENDU SUR LA PROPAGANDE D'ÉCLAIRAGE

Par M. COHU,

Chef du service des études à la Société pour le perfectionnement de l'éclairage.

But de la propagande. — Organismes de propagande, aux Etats-Unis, en France ; moyens mis en œuvre. — Tracts. — Démonstrations. — Projets. — Brochures.

BUT DE LA PROPAGANDE

Les industriels qui vendent de l'appareillage électrique s'adressent en général à une clientèle spécialisée déjà au courant des caractéristiques du matériel qu'elle désire acquérir. Cette clientèle possède le plus souvent une formation technique qui lui permet de se mettre rapidement au courant du fonctionnement des machines qu'elle a entre les mains, ainsi que du meilleur parti à en tirer.

Il n'en est pas de même pour la branche éclairage ; en effet, l'industriel qui vend du matériel d'éclairage s'adresse à un public extrêmement nombreux et varié, souvent ignorant, et en tous cas très rarement spécialisé.

Pour que la clientèle puisse tirer le meilleur parti des appareils qu'elle peut acquérir, et aussi pour que l'industriel et le commerçant puissent vendre leur matériel sans d'insurmontables difficultés, il faut que, par une éducation appropriée, le gros public soit mis à même de choisir parmi les types d'appareils existants, celui qui correspond aux buts à atteindre et ensuite de l'utiliser correctement. Il faut surtout le convaincre que, par suite de la brillance élevée de leur filament, les lampes à incandescence actuelles ne peuvent être employées nues, et nécessitent l'emploi d'appareils rationnels. De plus, il faut qu'il soit persuadé que toujours au moyen d'appareils rationnels, il est économique de répartir judicieusement la lumière.

ORGANISMES DE PROPAGANDE

États-Unis. — Les États-Unis ont, les premiers, compris tout l'intérêt que présentait la propagande pour l'éclairage rationnel et la G. E. C^o

a ouvert au public à Cleveland et à New-York des salles de démonstrations et des cours d'éclairage ; elle exécute aussi à titre gratuit, de nombreux projets d'éclairage visant à l'utilisation la meilleure de ses appareils et évitant surtout leur mauvais emploi. Cet exemple a été suivi par un grand nombre d'autres Compagnies et notamment par les Sociétés de distribution qui se préoccupent d'obtenir une bonne utilisation de leur énergie. Actuellement presque toutes les Sociétés distributrices américaines possèdent leur service d'éclairage.

France. — Le résultat obtenu aux Etats-Unis fut si encourageant que d'autres nations suivirent cet exemple, notamment la France pour laquelle la COMPAGNIE DES LAMPES commença aux environs de 1924 une vigoureuse campagne en faveur du meilleur éclairage.

En 1925, un grand nombre de Sociétés françaises intéressées au développement de l'éclairage, et particulièrement les Compagnies productrices et distributrices d'électricité, se mirent d'accord pour centraliser la propagande et l'éducation du public, et fondèrent la SOCIÉTÉ POUR LE PERFECTIONNEMENT DE L'ÉCLAIRAGE, organisme neutre ne vendant aucun matériel et ne faisant aucune opération commerciale.

Moyens mis en œuvre. — Les systèmes de propagande principaux mis en œuvre par cette Société sont les suivants :

- Le tract ;
- La démonstration ;
- Le projet ;
- La brochure.

Ces systèmes se complètent mutuellement.

Le tract prépare le terrain et éveille l'attention du public.

La démonstration retient son attention et le renseigne sur les questions générales.

Le projet lui permet la réalisation facile et rationnelle de ses installations. Il sert de modèle en même temps pour des réalisations ultérieures.

La brochure complète son éducation, traite des différentes spécialités et permet la solution directe, par les intéressés, de leurs problèmes d'éclairage.

TRACTS

Cette propagande a été menée avec méthode et ténacité par la diffusion de prospectus, de circulaires et de tracts progressivement gradués,

contenant des explications très courtes et des illustrations aussi frappantes que possible accompagnées de conseils extrêmement brefs résumés en quelques mots. Une série de brochures de vulgarisation, gratuites, traitant des principes ou des applications diverses de l'éclairage, et de fréquents articles, publiés dans les revues périodiques ou dans les journaux quotidiens, sont venus renforcer cette campagne éducative, que des conférences faites en différentes villes ont heureusement complétée.

Les chiffres suivants donneront une idée du matériel de propagande utilisé par la Société.

	Nombre	
Prospectus généraux.	820 000	}
Circulaires diverses	456 500	
Grands tracts de propagande à dépliant, de treize modèles différents, tirés en couleurs, ou en trichromie, ou en polychromie	2 189 000	
Petits tracts de propagande, tirés en couleurs (modèles divers)	844 000	}
Buvards illustrés tirés en couleurs (divers modèles)	106 000	
Cartes illustrées en couleurs.	100 000	
Timbres-papillons gommés en couleurs. . .	351 700	
		4 309 500
		537 700

Les prospectus, circulaires ou tracts ont été adressés aux personnes suivantes :

Particuliers. — Tous les noms figurant sur les annuaires de la Société française des Électriciens, de la Société française de physique, de la Société d'encouragement, des Anciens élèves des écoles d'Arts et Métiers, sur le Bottin mondain, sur les listes des locataires payant dans les grandes villes un loyer supérieur à 2 500 francs, sur les listes d'abonnés au téléphone à Paris, en banlieue et en province ; les architectes ; les médecins ; les avocats et avoués ; les banquiers ; les conseillers d'arrondissement ; les conseillers de préfecture ; les conservateurs des hypothèques ; les conseillers du commerce extérieur ; les directeurs des écoles commerciales, des écoles normales primaires, des écoles professionnelles, des écoles normales supérieures, des écoles techniques ; les inspecteurs primaires ; les ingénieurs ; les instituteurs des communes pourvues d'une distribution d'énergie électrique ; les juges de paix ; les juges au tribunal de commerce ; les notaires ; les préfets et les sous-préfets ; les professeurs des lycées et collèges ; les trésoriers payeurs généraux ; les propriétaires de vignobles, etc. . .

Commerçants et industriels. — Les noms figurant sur les différents annuaires du commerce et de l'industrie, des groupements professionnels ou des fédérations, sur les listes des abonnés au téléphone à Paris, en banlieue et en province; les membres de Chambres de commerce; les garages d'automobiles, les bazars et galeries; les bijoutiers, horlogers, orfèvres et joailliers; les fabricants et marchands de chaussures; les commissionnaires en marchandises; les coiffeurs; les fabricants de confection; les marchands de couleurs; les couturières; les droguistes; les fabricants et marchands de dentelles; les électriciens; les épiciers; les fourreurs; les filatures et tissages; les libraires éditeurs; les magasins de nouveautés; confection et rouennerie; les merceries; les modistes; les opticiens; les parfumeurs; les pâtisseries; les pharmaciens; les photographes; les quincailliers; les fabricants de produits chimiques; les débitants de tabac; les tapissiers décorateurs; les tailleurs; les teinturiers; les fabricants de tulles et dentelles; les négociants en vins, etc...

DÉMONSTRATIONS

La Société pour le perfectionnement de l'éclairage a installé des salles de démonstrations, ouvertes en permanence aux visiteurs, et dans lesquelles sont démontrés les principes généraux de l'éclairage; les différents systèmes, les principaux appareils existant sur le marché y sont exposés avec leurs courbes caractéristiques. Les Ingénieurs de la Société fournissent aux visiteurs des renseignements sur les questions qui les préoccupent et sur les problèmes qu'ils ont à résoudre; ce contact direct est des plus profitables; très souvent, les visiteurs reviennent demander des renseignements complémentaires, des adresses de fabricants d'appareillage, des études de projets; ils peuvent préciser les notions acquises au moyen des brochures qui leur sont distribuées, et dont il sera question plus loin.

Le nombre des visiteurs croît constamment, il a été d'environ 200 pour le mois de mars 1929.

PROJETS

La Société pour le perfectionnement de l'éclairage effectue gratuitement pour toute personne qui en fait la demande, des projets d'éclairage de toute nature. Elle a effectué depuis sa fondation un peu plus de huit cents projets répartis sur trois années à peine (fig. 1 et 2). L'im-

portance et la teneur de ces études sont infiniment variées : installations

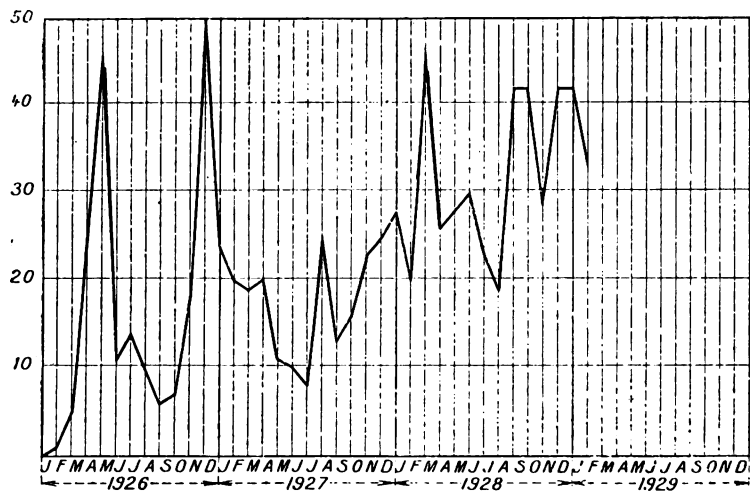


Fig. 1. — Nombre total de projets étudiés par mois.

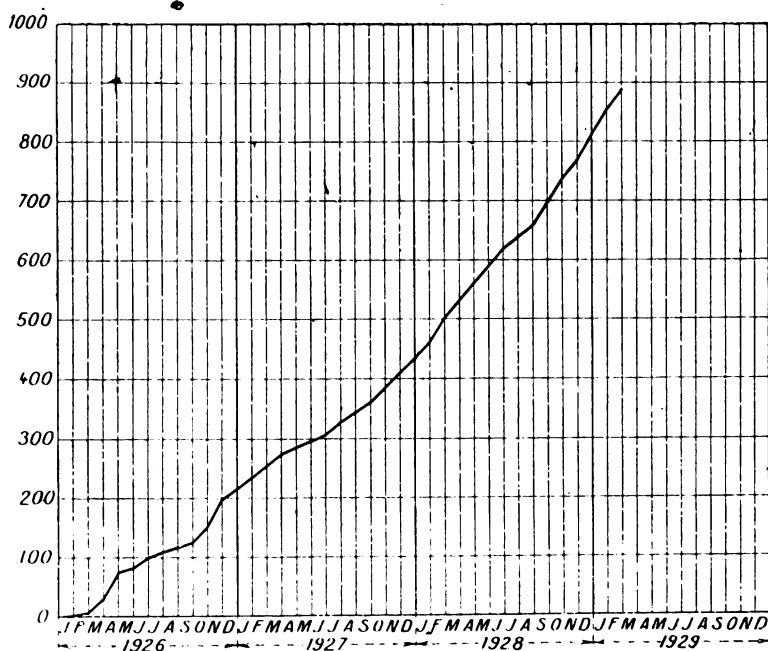


Fig. 2. — Nombre total de projets étudiés.

d'éclairage d'usines, de magasins, d'hôpitaux, de bateaux ; éclairage public, éclairage des wagons, de terrains de sports, d'églises, etc...

La Société ne vend aucun appareil et ne fait aucun commerce sous quelque forme que ce soit ; ses projets ne peuvent donc être suspectés de servir les intérêts commerciaux de tel ou tel constructeur : ils servent en bloc à la propagande générale.

A cet effet, les projets recommandent, pour l'éclairage d'un local déterminé, non pas un appareil explicitement désigné, mais un type d'appareil figurant dans la brochure n° 4, intitulée *Projets d'éclairage*.

Ce type d'appareil est choisi uniquement en vue de répondre le mieux possible au but proposé : Il est désigné par un numéro d'ordre. Les différents appareils de chaque type sont reproduits sur des feuilles jointes aux projets et sur lesquelles figurent les adresses des constructeurs.

La Société possède, d'autre part, dans ses salles de démonstration, des modèles d'appareils de tous les constructeurs qui ont bien voulu les lui confier ; elle exige seulement que ces appareils aient été essayés au préalable par le Laboratoire central d'électricité, organisme officiel dont les résultats d'essais présentent le maximum de garantie d'exactitude et ne peuvent être soupçonnés de partialité. Chacun des appareils entre dans une subdivision de la classification générale de la brochure 4.

Cette façon de faire permet donc de laisser beaucoup de latitude dans le choix des appareils ; le projet indique seulement le type de luminaire répondant le mieux au problème posé.

Ainsi, tout en ne favorisant de façon spéciale aucun appareil, la Société fait bénéficier l'ensemble des constructeurs de sa propagande. De plus, grâce au grand nombre d'appareils existants, elle peut varier les solutions des problèmes et les résoudre au mieux.

Le nombre des personnes ayant recours aux bons offices de la Société augmente rapidement, ainsi qu'en témoigne la courbe du nombre total de projets établis. Ce nombre, qui fut de 440 pour chacune des années 1926 et 1927, a passé à 820 pendant l'année 1928 (1). On voit donc que le nombre de projets effectués pour l'année 1928 est presque égal à celui des années 1926 et 1927 réunies. Il a été aussi constaté qu'un nombre plus grand d'architectes s'est intéressé à la question et a consulté la Société pour des projets d'immeubles en construction. Il a été possible de réaliser ainsi des installations largement prévues, apportant

(1) Voir courbes du nombre de projets effectués mensuellement (fig. 1).

plus de bien-être, grâce à des éclairagements suffisants et à des appareils judicieusement choisis et exempts d'éblouissement.

BROCHURES

Les brochures de vulgarisation éditées par la Société pour le perfectionnement de l'éclairage, sont envoyées gratuitement à tous ceux qui en font la demande et sont adressées régulièrement, au fur et à mesure de leur publication ou de leur réédition, aux personnes figurant sur une liste spéciale; elles sont adressées également à toutes les écoles techniques mentionnées sur une liste remise à la Société par M. LABBE, directeur de l'enseignement technique. Un grand nombre d'écoles en demandent fréquemment l'envoi pour en distribuer à leurs élèves à titre de récompense. Ces brochures représentent d'ailleurs une œuvre importante. Plusieurs d'entre elles n'ont pas moins de 80 pages, avec une soixantaine de figures ou de reproductions photographiques; elles donnent des indications très complètes sur les différentes applications de l'éclairage dans les habitations, les bureaux, les magasins, les ateliers, les voies publiques, etc... elles sont sans cesse remaniées, mises à jour et améliorées, et constituent ainsi une documentation importante. La brochure O, intitulée *Notions sommaires d'électricité* » contient un cours complet d'électrotechnique à la portée de tout le monde et permet aux lecteurs non initiés de lire avec profit toutes les autres publications.

La Société pour le perfectionnement de l'éclairage a édité jusqu'ici environ 400 000 brochures sur les sujets suivants :

Numéros : 00 Salles de démonstrations de la Société pour le perfectionnement de l'éclairage ».

- 0 Notions d'électricité.
- 1 Lumière et vision.
- 2 Réflecteurs et diffuseurs.
- 3 Unités et mesures photométriques.
- 4 Projets d'éclairage.
- 4 B. Coefficients d'utilisation.
- 5 Eclairage des magasins.
- 5 B. Eclairage des vitrines des magasin.
- 6 Eclairage des ateliers.
- 7 Eclairage des habitations.
- 8 Eclairage des bureaux et écoles.
- 9 Eclairage des voies publiques.

Il est prouvé que la brochure est, peut-être, le mode de propagande le plus efficace ; en effet, la démonstration d'éclairage est une méthode générale qui s'applique surtout aux principes ; le projet, par contre, est exécuté seulement en vue d'une application déterminée ; enfin, la brochure permet de mettre, sous une forme concise et condensée, des principes, des exemples de réalisations. Elle met entre les mains des intéressés des outils leur permettant de résoudre leurs différents problèmes.

On ne conserve pas le plus souvent les tracts reçus, on les jette. On conserve, de la démonstration, seulement un souvenir. On garde bien le projet dans ses archives, mais il ne s'applique qu'à une solution particulière, tandis qu'une brochure, bien présentée et soigneusement éditée, est conservée ; on s'y reporte lorsqu'on a une question à résoudre ou un renseignement à y puiser, on la prête, on la fait circuler, elle donne l'idée à son possesseur de demander des renseignements, des études de projets, etc. . .

La propagande pour un meilleur éclairage commence à porter ses fruits. Evidemment, il est très difficile, sinon impossible, de chiffrer le résultat de ses efforts ; néanmoins, un nombre toujours croissant de centrales s'y intéressent et créent des services d'éclairage ; les installateurs et les fabricants d'appareillage spécialisent des ingénieurs dans cette branche pour leurs besoins personnels ; ils éditent aussi des brochures destinées à familiariser le public avec les emplois de la lumière et des appareils qui la dirigent.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

VISITE DE L'INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS

en France, en juin 1929

L'Institution of electrical engineers, de Londres, répondant à l'invitation que notre Président, M. P. BUNET, lui avait apportée en février dernier, a bien voulu tenir en France sa réunion d'été.

Le 11 juin au soir, un groupe d'une centaine de personnes dont un tiers de dames, ayant à leur tête M. le Colonel EDGCUMBE, Président de l'Institution et M. ROWELL, Secrétaire, arrivaient en gare du Nord, où ils étaient salués par notre Président, M. P. BUNET.

Le lendemain, dès 9 heures, un premier groupe se rendait à Saint-Ouen où M. PÉCHEUR faisait les honneurs de l'usine de la C. P. D. E., puis à Gennevilliers où M. Ernest MERCIER exposait, en un anglais impeccable, les solutions qu'il a appliquées dans sa célèbre centrale. Un autre groupe visitait le Laboratoire à un million de volts de la Compagnie électrocéramique à Ivry, où MM. BELLOW et LEHMANN, Ingénieurs de la Compagnie, répétèrent les expériences que permet l'emploi des très hautes tensions, puis l'usine d'Ivry, de l'Electricité de la Seine, où ils étaient reçus par M. RAULT.

Pendant ce temps, les dames anglaises étaient accueillies par un Comité de dames françaises qui groupait, autour de Mme BUNET, Mmes ADAM ARRIGHI DE CASANOVA, CAHEN, Mlle CAHEN, Mmes GROSSE-LIN et JOLY. Toutes se rendaient chez le grand couturier Worth, qui voulut bien faire défiler devant elles ses plus sensationnelles créations, puis à la joaillerie BOUCHERON, dont le directeur M. RADIUS, leur présenta des pièces d'une valeur inestimable.

L'après-midi, M. P. JANET recevait les Ingénieurs dans les nouveaux locaux de l'Ecole Supérieure d'Electricité dont il leur exposait l'organisation.

Le soir, un banquet de 250 couverts, offert par la Société Française

des Electriciens, par la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité et par le Groupement des Secteurs de la Région parisienne, réunissait à l'Hôtel Continental nos collègues des deux nationalités.

M. BUNET, puis M. MALÉGARIE, leur souhaitaient la bienvenue et M. K. EDGCUMBE répondait en un français très pur, relevé d'un humour tout britannique.

Le lendemain, un groupe de Français et d'Anglais visitaient la station de Sainte-Assise, sous la conduite de son directeur ; les réseaux de concentration des ondes courtes parurent les intéresser particulièrement.

Le soir, après une visite du Château de Versailles, où les avait guidés M. MAURICHEAU-BEAUPRÉ, conservateur-adjoint, ils s'arrêtaient aux Etablissements Belin. En l'absence de MM. BELIN et MESNY, retenus à Berlin, l'Amiral MORNET, Administrateur Délégué, les initiait aux procédés de transmission de photographie à distance.

Le vendredi après-midi, M. MACON conservateur-adjoint du château de Chantilly, leur en faisait admirer les riches collections.

Le samedi matin un premier groupe visitait, sous la direction de M. MALÉGARIE, de MM. ASTIER, DESSUS et GIRARDIN et, peut-on dire avant la lettre, puisqu'elle n'était pas officiellement inaugurée, la nouvelle Centrale de la Compagnie Parisienne de distribution d'électricité, à Issy-les-Moulineaux. Un autre groupe se rendait à l'Office National des Inventions de Bellevue. M. BRETON, que son état de santé empêchait de les recevoir, avait délégué, pour le faire, la plus grande partie de son état-major. M. COTTON, membre de l'Institut, secondé par M. MABBOUX, voulut bien prendre la peine de leur montrer son fameux électro-aimant et de réaliser des expériences mettant en évidence l'intensité du champ magnétique obtenu.

MM. MESNAGER et VEYRIER les initiait, à leur tour, aux méthodes d'essais de barrages sur des modèles réduits où le plâtre est substitué au ciment et le mercure à l'eau, permettant ainsi d'obtenir des déformations comparables à celles qui interviennent dans les ouvrages réels.

Pendant ce temps, les dames visitaient la manufacture de porcelaine de Sèvres, sous la conduite du Directeur, M. LECHEVALLIER-CHEVIGNARD et admiraient les plus belles pièces françaises ainsi que celles de l'exposition russe.

Le 16 juin, un train spécial, gracieusement mis à notre disposition par la Compagnie des chemins de fer de Paris à Orléans et par la Compagnie des chemins de fer du Midi, emportait vers les Pyrénées nos collègues auxquels s'étaient joints un certain nombre de Français

et de Françaises dont notre président M. BUNET, et M^e BUNET. Trois ingénieurs, montés sur la locomotive, se rendaient compte des excellentes conditions de roulement dans lesquelles la traction électrique permet de dépasser la vitesse de cent kilomètres à l'heure.

A Eguzon des autocars, que M. Gustave MERCIER avait bien voulu, malgré des difficultés exceptionnelles, faire venir de fort loin, nous amenaient au barrage et M. LAPORTE, Directeur de l'Union hydroélectrique, donnait sur place toutes explications utiles. Puis notre train nous conduisait à Bordeaux où nous passions la nuit et de là à Pau. Dans cette ville, M. PIQUEMAL, Inspecteur à la Compagnie du Midi et M. DEMORY, Ingénieur à la Compagnie Electromécanique, nous faisaient visiter la station de redresseurs Brown-Boveri, tandis que les dames montaient au château.

Le soir, un banquet, organisé par notre groupe du Sud-Ouest, réunissait tous les participants sous la présidence de M. DELASALLE, président du groupe. Le lendemain, des autocars de la Compagnie du Midi nous menaient à la Centrale hydroélectrique du Hourat, dont M. BACHELLERY, Ingénieur en chef, avait bien voulu venir lui-même nous faire les honneurs. Nous gagnions ensuite Lourdes par le col d'Aubisque, que le service des Ponts et Chaussées avait, pour nous être agréable, rouvert quelques jours plus tôt que la date prévue.

Le 19 juin, au cours d'une excursion à Gavarnie, nous nous arrêtons à l'usine de Soulom qui appartient à la Société des phosphates tunisiens. M. FERRAND, Directeur et M. PERRAUD, Ingénieur en chef, nous y faisaient suivre toutes les phases de la fabrication de l'acide nitrique et du nitrate de calcium par oxydation de l'ammoniaque ; celle-ci est obtenue par la combinaison de l'azote atmosphérique avec l'hydrogène provenant de l'eau électrolysée dans des appareils Knowles et Pechkranz.

Rappelons que ces deux types d'électrolyseurs ont fait l'objet de deux communications insérées au Bulletin : la première, de M. SARROT DU BELLAY ⁽¹⁾, la seconde de M. PECHKRANZ ⁽²⁾.

Au retour vers Lourdes, nous nous arrêtons à la Centrale hydroélectrique de Luz, installée jadis par M. BUNET et tous félicitaient notre président des dispositions particulièrement heureuses qu'il avait su prendre. Le 20 juin, nos autocars nous amenaient à l'usine de Lanne-mezan de la Société des produits azotés, dont M. Henri GALL nous avait très aimablement fait ouvrir toutes les portes et que son fils M. Jean

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens.*

(2) *Ibidem.*

GALL, assisté de M. LEROY, Directeur et de M. PUECH, Ingénieur en chef, nous fit visiter en détail.

Cette usine comprend trois parties : fabrication de carbure de calcium, distillation de l'azote à partir de l'air liquide (procédé Claude) et fabrication de la cyanamide : elle peut fournir par an 4 500 T de ce dernier produit.

Vers 16 heures, nous arrivions à Toulouse, où des voitures de tramways, gracieusement mises à notre disposition par M. PÉRIDIER, nous permettaient de parcourir la ville sans fatigue. Nous descendions au laboratoire d'hydrotechnique de Banlève, que, en l'absence de M. CAMICHEL, M. ESCANDE nous faisait visiter et à l'Institut électrotechnique. L'organisation de ces deux établissements, qui fait le plus grand honneur à M. CAMICHEL fut particulièrement appréciée des visiteurs.

Le soir, à la demande de M. JUPPONT, président du groupe de Toulouse et malheureusement absent, lui aussi, le maire de Toulouse nous offrait le champagne au Capitole dans la salle des Illustres, dont nos collègues admirèrent la très somptueuse et artistique décoration.

Enfin, le 22 juin, après une visite à la vieille cité de Carcassonne, notre train spécial nous ramenait à Paris.

Les articles parus, depuis, dans les divers journaux techniques de Grande-Bretagne, nous ont attesté à quel point les membres de l'Institution avaient été frappés des progrès réalisés chez nous dans les diverses branches de l'électrotechnique, et notamment dans celle de l'électrochimie.

Ils n'ont pas été moins sensibles à la somptueuse cordialité des réceptions qui les ont partout accueillis : qu'il nous soit permis de nous unir à eux pour remercier ici tous les dirigeants des Sociétés qui ont ainsi assuré le plein succès de cette manifestation.

Ajoutons que les derniers mots prononcés, en nous quittant, par le Président M. le Colonel K. EDGUMBE, ont été « Au revoir, à bientôt, en Angleterre ». Nous espérons qu'un grand nombre de nos membres pourront répondre à cet appel et se rendre aux fêtes du Centenaire de Faraday, pour resserrer encore la chaîne qui attache étroitement l'une à l'autre nos deux Sociétés.

TRAVAUX DES SECTIONS

SOMMAIRE

- 1^{re} SECTION. — Note au sujet des essais en récupération des alternateurs synchrones (M. L. GRATZMULLER), p. 768. -- Alternateur auto excitateur sans connexions entre stator et rotor. Circuits du rotor à collecteur fermé sur self-inductances. Rôle de cet alternateur comme excitatrice rotorique de machines asynchrones (M.-L. GRATZMULLER), p. 769.
- 2^o SECTION. — Emploi des tubes à néon de grande intensité au balisage des champs d'aviation (M. ABADIE), discussion, p. 771. — Tubes à cathode incandescente, renseignements fournis par M. M. LEBLANC, p. 771. — Eclairage des studios (M. CABET), discussion, p. 771.
- 3^o SECTION. — Les électrolyseurs (M. PECHKRANZ), p. 772. — Comparaison des procédés d'extraction électrolytique de l'iode avec les procédés actuels (M. HOLLARD), p. 775. — Les fours à haute fréquence à étincelle et leur facteur de puissance (M. DUFOUR, réponse à la note de M. GUTMANN), p. 777. — Théorie de l'accumulateur au plomb (M. ROLLET), discussion, p. 779.
- 4^o SECTION. — Détermination des courants de court circuit à l'aide d'un modèle électrique (M. VAN SRAVEREN), discussion, p. 780. — Emploi des couteaux de sectionnement pour la rupture de la marche en parallèle des transformateurs (M. P. BUNET, p. 780. Note de M. CONGE, p. 784. — Discussion, p. 785. — Exploitation des sous-stations extérieures (M. BARILLOT), discussion, p. 785.
- 5^o SECTION. — Remise à l'heure des horloges par lignes téléphoniques (M. CHAUVÉAU), Discussion, p. 786. Définition de l'unité de fréquence, avis de la Section, p. 787. — Télégraphie à fréquences acoustiques, d'après un article de M. Cruickshank (M. PAGES), p. 787.

1^{re} SECTION. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

Président : M. Paul GIRAULT.

SÉANCE DU 14 MARS 1929. — La Section prend connaissance des deux notes suivantes de M. GRATZMULLER :

1^o *Au sujet des essais en récupération des alternateurs synchrones, voici quelques réflexions :*

Dans la séance de la 1^{re} Section du 5 mars 1926, l'ordre du jour comportait la question suivante :

Etude sur la détermination expérimentale des pertes dans les alternateurs.

J'ai spontanément exposé dans la discussion, à cette séance, sans

aucune étude préalable, le principe de récupération en charge des alternateurs synchrones.

Outre l'intérêt de l'essai en charge des alternateurs synchrones aux différentes charges, le procédé permet de mesurer directement et par suite avec précision les pertes à fournir soit électriquement, soit mécaniquement. Un texte parut à ce sujet dans le Bulletin de mars 1928. Or, notre Président d'honneur M. BLONDEL, a exposé le principe de récupération en question, le 4 janvier 1893, à notre Société qui s'appelait alors « Société Internationale des Electriciens.

De plus M. GUILBERT a mentionné le système de M. BLONDEL, dans son ouvrage sur les *Essais de machines*. M. BLONDEL a fait différentes applications pour l'étude pratique des alternateurs du service des phares.

On se pénètre enfin, en France, de la valeur de l'expérimentation en construction électrique. *L'inauguration du Laboratoire d'essai de Delle est, on peut dire, en France un fait historique fondamental*. Que de mécomptes eussent été évités pour les constructeurs s'ils avaient utilisé la méthode de M. BLONDEL, pour faire des essais en pleine charge de leurs gros alternateurs.

L'alternateur du groupe générateur de Delle pour les essais des interrupteurs permettrait d'essayer en charge des alternateurs d'environ 250 000 kVA. Si l'existence du groupe de Delle est justifiée pour l'essai d'interrupteurs, ne l'est-elle pas de toute évidence pour l'essai des alternateurs de grandes puissances ?

Une discussion des modalités de détail des procédés de récupération des alternateurs synchrones s'impose donc.

2° *Alternateur auto-excitateur sans connexions entre stator et rotor. Circuits du rotor à collecteur fermé sur self-inductances. — Rôle de cet alternateur comme excitatrice rotorique de machines asynchrones.*

Je m'excuse d'avoir pris aussi tardivement connaissance du compte rendu des discussions de la 1^{re} Section à la semaine d'octobre, compte rendu paru dans le Bulletin n° 79 de mars 1928.

C'est avec grand plaisir que j'ai lu, p. 270, que M. BELFILS a présenté une note très intéressante de M. BERGER, concernant quelques réalisations industrielles du dispositif d'alternateur auto-excitateur que j'ai imaginé, breveté en 1902 pour la Compagnie Française Thomson-Houston, avec mention « dispositif Gratzmuller » et présenté en 1903 à la Société Française des Electriciens. Il correspond à la figure 12.

Cela m'est vraiment tout à fait agréable de constater que c'est sur le

conseil de M. BETHENOD, avec rappel de mon antériorité, que ces réalisations ont été faites.

C'est d'ailleurs dans cette communication de janvier 1903, que j'ai exposé aussi le rôle de *l'inductance négative à collecteur*, pour excitation rotorique des machines asynchrones.

Ce dispositif a été connu successivement sous les noms de : Mlles WALKER, SHERBINS, puis Maurice LEBLANC. M. DE PISTOYE, seul dans la littérature technique, a fait allusion à cette antériorité et je l'en remercie (Technique moderne, 1928). Antériorité reconnue par le regretté Maurice LEBLANC dès 1903, par la lettre publiée seulement en mars 1926, dans notre bulletin.

La note de M. BERGER prévoit à l'alinéa du bas de la page 272, cet alternateur comme excitatrice de machine asynchrone.

Or, ce dispositif d'excitation rotorique de machine asynchrone a été prévu très nettement dans ma participation à la discussion d'octobre 1925, dont le compte rendu a été publié dans le Bulletin n° 55 de mars 1926, figure 6. Il a été breveté le 24 octobre 1925. Le dispositif était présenté comme une conséquence intuitive immédiate de l'alternateur auto-excitateur précédent, et de ma manière de concevoir le rôle des petits alternateurs à collecteur auto-excitateur de machines asynchrones. C'est d'ailleurs précisément le mode d'exposition de la question, par M. BERGER. Bien entendu, quoique le travail que j'ai présenté soit indépendant, réserve doit être faite au point de vue antériorité car des brevets ont pu mentionner le dispositif.

Or, c'est le cas du brevet allemand Siemens déposé le 4 octobre 1924. Le brevet français a été déposé le 26 septembre 1925 et publié seulement le 22 avril 1926. Le mien a été déposé le 24 octobre 1925.

Le brevet allemand de Siemens est-il accordé ou valable car, en électrotechnique on ne brevète que des schémas et non pas le dimensionnement. Or, un enroulement en court-circuit sur le stator de l'excitatrice a pu être prévu antérieurement pour d'autres motifs sans songer à l'auto-excitation. Je crois qu'il en est ainsi. Tout autre était notre point de vue, car, nous n'avions pas expérimenté. Je n'en sais pas plus.

Je profite de l'occasion pour signaler que si je crois toujours à l'intérêt du passage en synchrone d'une machine asynchrone à excitation rotorique, le mode de réalisation proposé à la figure 7, page 276 est entaché d'une erreur fondamentale de principe, bien que le dispositif s'applique à toute excitatrice auto-excitatrice, mais n'appartenant pas au genre convertisseur, c'est-à-dire alimentée en alternatif par des bagues.

Les remarques ci-dessus prouvent encore que les discussions de la

S. F. E. et les publications de leurs textes doivent être suivies avec le plus grand soin au jour le jour par l'élite de nos ingénieurs.

**2^e SECTION. — ÉCLAIRAGE. — CHAUFFAGE.
RADIATIONS DIVERSES.**

Président : M. DARMOIS.

SÉANCE DU 16 AVRIL 1929. — M. ABADIE présente une communication sur *l'emploi des tubes à néon de grande intensité au balisage des champs d'aviation* ⁽¹⁾.

M. le Président remercie M. ABADIE de son intéressante communication. M. AYCObERRY donne ensuite quelques précisions sur les tubes Georges CLAUDE, au point de vue de leur disposition et de leurs caractéristiques. Il signale, en particulier, que l'intensité de ces tubes est de 200 milliampères pour le diamètre de 11 cm.

Après un échange d'observations auquel prennent part M. le Président, MM. AYCObERRY, LAPORTE et LEPAPE, M. le Président communique des renseignements donnés par M. Maurice LEBLANC sur les tubes à cathode incandescente et les recherches faites par la Cooper Hewitt Electric et la General Electric Company.

Dans ces tubes à basse tension et à grande intensité, on utilise comme cathode un filament incandescent. Pour éviter la destruction rapide de la cathode, on constitue celle-ci d'une plaque de métal qu'un filament incandescent chauffe par rayonnement. Quand la cathode est suffisamment chaude, on fait passer dans le tube une décharge à haute tension d'une manière analogue à celle utilisée pour l'allumage des tubes à vapeur de mercure. Quand le tube est allumé, on peut interrompre le courant qui traverse le filament, la cathode étant maintenue à une température suffisante par le choc des ions positifs.

M. CABET présente un rapport sur *l'éclairage des studios* ⁽¹⁾.

Au cours de la discussion qui suit cette communication, M. Maurice LEBLANC fait remarquer que les avantages de certains systèmes d'éclairage pour les studios de cinéma, ne s'appliquent plus aux studios de

(1) Cette communication est publiée dans les rapports annuels de la 2^e Section, page 749 du présent *Bull. tin.*

(2) Cette communication est publiée dans les rapports annuels de la 2^e Section, page 736 du présent *Bulletin.*

photographie et que les lampes à vapeur de mercure donnent dans ce dernier cas, toute satisfaction.

M. OSWALD insiste sur le fait que des recherches sont poursuivies pour améliorer les arcs au point de vue de l'utilisation dans les studios, qu'ils n'ont pas encore dit leur dernier mot. Ils ont en particulier l'avantage de mettre en relief certains objets ou certains sujets, mieux que ne le feraient les lampes à incandescence. Si les arcs sont handicapés dans les films sonores, à cause de leur bruit, on pourrait remédier à cet inconvénient, en les séparant du studio.

3^e SECTION. — ELECTROCHIMIE. — ELECTROMÉTALLURGIE. PILES. — ACCUMULATEURS.

Président : M. Charles MARIE.

SÉANCE DU 23 MARS 1929. — M. le Président donne la parole à M. PECHKRANZ, après l'avoir remercié d'avoir bien voulu honorer de sa collaboration la Société Française des Electriciens.

M. PECHKRANZ commence sa communication sur *les Electrolyseurs*, par un rappel des données numériques caractéristiques de l'électrolyse de l'eau.

2 400 Ah par m³ d'hydrogène à 0°C, sous la pression de 760 mm de mercure ; 3,52 kWh, par m³ d'hydrogène, d'énergie minima théoriquement nécessaire ; tension minima de décomposition 1,47 V.

On a cru (en Allemagne et en Italie), obtenir une économie en diminuant cette tension par l'électrolyse sous pression élevée; l'expérience ne confirme pas cette façon de voir, car d'autres phénomènes viennent annuler l'avantage obtenu.

La surtension aux électrodes s'ajoute à la tension théorique minima. Enfin, il faut encore ajouter la chute de tension due à la résistance de l'électrolyte, cette chute de tension étant d'ailleurs réduite par la diminution de la distance entre les électrodes.

L'électrolyseur Pechkranz est caractérisé par le montage en série d'un grand nombre de cellules, dont l'ensemble rappelle un filtre-presse de section circulaire.

Les électrodes, qui forment en même temps les parois des cellules, sont en tôle de fer de 3 à 5 mm d'épaisseur, nickelées sur une face ; de telle sorte que chaque cellule comporte une paroi de nickel (anode) et une paroi de fer (cathode). Le nickel et le fer ont été choisis, en particulier, pour leurs faibles surtensions respectives par rapport à l'oxygène et à l'hydrogène. Un diaphragme de nickel (feuille de 1/10 mm,

perforée de trous carrés extrêmement fins) sépare la cellule en deux compartiments (800 trous par cm^2).

Aussi longtemps que la tension par cellule est inférieure à 3,2 V, le diaphragme ne peut fonctionner en électrode bipolaire. Le courant passe par les pores et non par le métal même.

La chute de tension due au diaphragme, très mince, est inférieure à $1/10^{\circ}$ de volt.

Les joints sont en amiante pur, tressé, imprégné d'un composé organique non saponifiable et résistant à l'électrolyse, à l'oxygène naissant et à la potasse caustique chaude et concentrée, ce que ne saurait faire le caoutchouc par exemple.

L'électrolyte est la potasse caustique, qu'on obtient plus facilement exempte de chlore que la soude caustique. La potasse caustique présente encore trois autres avantages :

Le carbonate, que l'on ne peut éviter entièrement à cause de l'acide carbonique amené avec l'eau distillée, reste dissous au lieu de cristalliser ; la conductibilité à froid est beaucoup plus grande, de sorte que, dès la première minute après un arrêt, le courant total peut passer ; enfin, pour une température donnée, il est possible d'augmenter la conductibilité par une concentration plus élevée.

Avantages du montage en filtre-presse sur les électrolyseurs à cuves.

1° Possibilité d'employer de grosses unités (600 kW au lieu de 25 kW).

2° Bon isolement de chaque unité qui repose entièrement sur 4 pieds dont 2 sont à la terre, et 2 isolés (sous tension).

3° Sortie des gaz au potentiel du sol, supprimant le danger d'explosion par étincelles dans une partie isolante de la tubulure.

4° Remplissage complet de l'appareil par le liquide, ce qui supprime toute accumulation de gaz explosifs.

5° Encombrement dans le rapport de 1 à 3 avec celui d'autres systèmes.

6° Etanchéité, d'où absence de carbonatation et d'évaporation d'eau.

7° Absence de concentration d'électrolyte nuisible à la cathode car, dans le filtre-presse, la circulation réunit constamment les liqueurs cathodiques et anodiques.

8° Refroidissement artificiel par circulation d'eau, avec récupération de la chaleur provenant de l'effet joule (30 à 60 pour cent de l'énergie totale), l'eau de réfrigération sort à 70°C , et est distillée dans le vide, pour alimenter les électrolyseurs.

9° Possibilité de prélever les gaz sous une pression allant jusqu'à

1 mètre d'eau, alors que les cuves ne permettent qu'environ 1 dm, de sorte qu'on évite souvent les surpresseurs. Le filtre-presse est, de plus, totalement insensible à une différence de pression entre les gaz.

de caoutchouc et tubes de verre pour la sortie des gaz. Tous ces or-

10° Suppression des innombrables joints de sorties de courant, tubes ganes, dont fourmille littéralement une batterie à cuves, présentent des dangers.

11° Suppression des connexions qui, dans le système à cuves existent, non seulement entre cellules, mais encore entre les différentes électrodes d'une cellule d'où leur grand nombre. Lorsque l'on songe qu'il faut au moins un écrou par kilowatt dans les systèmes à cuves, l'on peut se représenter le travail de surveillance et de nettoyage d'une batterie d'électrolyseurs un peu importante.

12° Simplification du contrôle.

Par rapport à une batterie à cuves, il y a 24 fois moins de valeurs de densités à contrôler et 24 fois moins de valeurs de températures à relever. En pratique, les surveillants d'une batterie à filtre-presse sont cinq fois moins nombreux que ceux d'une batterie à cuves.

13° Surface de refroidissement, un grand nombre de fois inférieure à celle des cuves, ce qui s'oppose à un refroidissement trop intense par l'air ambiant. Même au gros de l'hiver, le filtre-presse peut fonctionner sous un simple auvent ou même complètement à ciel ouvert. Il en résulte à la fois l'économie du chauffage, et celle du bâtiment.

14° Possibilité, lors d'un travail de révision ou de retouche, de couper le courant alimentant un filtre-presse par le disjoncteur correspondant. Les autres appareils prennent très facilement le nombre total des ampères disponibles, de sorte qu'il n'y a, pendant le travail de réparation aucune diminution de production de gaz. Dans une installation à cuves, par contre, tout travail doit être précédé de l'arrêt de toute la série pour permettre la mise en court-circuit de la cuve à traiter et l'obturation des conduites de gaz. Le même arrêt de toute la production de gaz se reproduit lorsqu'on insère à nouveau la cuve dans le circuit.

15° Réglage plus facile de la température, d'où plus grande souplesse de marche. Le filtre-presse peut marcher au tiers de sa charge normale comme à 200 pour cent au-dessus, tout en restant à la température optima de fonctionnement, qui, dans notre système avec diaphragmes de nickel et potasse caustique concentrée, est de 80°C.

Cette propriété primordiale permet l'utilisation très rationnelle des courants de déchet.

 Répondant à diverses questions qui lui sont posées, M. PECHKRANZ donne les indications complémentaires ci-après :

Teneur de la potasse en Cl : Il est bon de ne pas dépasser 0,02 pour cent.

Degré de pureté des gaz :

H garanti 99,5 pour cent ; observé 99,8 à 99,9 pour cent,

O garanti 98,5 pour cent ; observé 99 à 99,5 pour cent.

L'hydrogène se dégage en bulles extrêmement fines, à l'aspect d'émulsion.

L'oxygène se dégage en bulles plus grosses.

Il est plus facile d'empêcher l'oxygène de passer dans l'hydrogène, que l'inverse.

Aussi le diaphragme est-il placé plus près de l'anode que de la cathode (rapport de 12 à 18) ; malgré cette précaution, l'hydrogène reste plus pur que l'oxygène.

M. PECHKRANZ donne de nouveaux détails sur la fabrication des diaphragmes, par dépôt électrolytique sur des matrices spéciales.

SÉANCE DU 20 AVRIL 1929. — M. HOLLARD fait une communication sur *la comparaison des procédés d'extraction électrolytique de l'iode avec les procédés actuels.*

M. HOLLARD passe en revue les procédés utilisés pour cette préparation, à partir des « soudes » c'est-à-dire des cendres de Laminaires, du *Laminaria flexicaulis* en particulier. Ces soudes, qui tiennent 1 pour cent d'iode en moyenne, sont accompagnées de sulfures, sulfites et hyposulfites en quantités d'autant moindres qu'elles sont restées plus longtemps en magasin où l'air continue l'oxydation. Ces soudes sont épuisées par l'eau dans des batteries et leurs solutions concentrées à 40 g d'iode par litre. Les sels de potassium précipités au cours de cette concentration sont très appréciés des agriculteurs.

La solution concentrée de soude est acidifiée par SO_4H^2 et portée à l'ébullition, ce qui élimine les composés sulfurés et provoque la précipitation du soufre qui se rassemble et qu'on enlève.

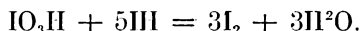
Dans le liquide acide l'iode est précipité par des oxydants : chlorate de potasse, chlore, nitrite de soude, bichromate de soude. Ce dernier laisse dans les eaux mères 350 g d'iode par m², les autres 500 g. Le liquide acide peut aussi être traité par du sulfate de cuivre en présence de bisulfite de soude, ce qui donne un précipité plus complet que par les procédés précédents, mais l'emploi nécessaire d'un excès de sulfate de cuivre rend le procédé coûteux malgré la régénération de ce métal.

L'usage du bioxyde de manganèse avec distillation directe de l'iode, exige une concentration de 100 g d'iode par litre pour le moins.

M. HOLLARD a fait breveter un procédé d'oxydation des solutions al-

calines de soude par le courant électrique ; ce courant oxyde d'abord les composés sulfurés en les faisant passer à l'état de sulfates, puis l'iode de potassium qui passe à l'état d'iodate.

On arrête le courant lorsque la sixième partie de l'iode a été oxydée ⁽¹⁾, ce qui se fait avec un bon rendement et sans dégagement d'oxygène à l'anode. On acidifie alors avec SO_3H^2 qui précipite l'iode.



On s'aperçoit très facilement du moment où le courant doit être arrêté en prélevant quelques gouttes de l'électrolyte et en l'acidulant avec de l'acide sulfurique ; filtrant l'iode et ajoutant au liquide filtré de l'iode de potassium ; celui-ci redonne la couleur de l'iode en présence de la plus petite quantité d'iodate.

Les eaux mères tenant encore de l'iode, comme celles des autres procédés, peuvent en être débarrassées par addition d'eau de Javel qui fait passer l'iode colloïdal et l'iode de potassium à l'état d'acide iodique. Le même résultat serait obtenu par passage du courant en milieu acide avec formation d'acide iodique. L'iode libre provenant de la dissociation de l'acide iodique (si faible soit-elle), est absorbée par le charbon en poudre qu'on ajoute (charbon de bois ordinaire, par exemple) ; ce qui libère une nouvelle quantité d'iode aux dépens de l'acide iodique restant. Il se produit ainsi une série de dissociations de l'acide iodique qui finit par céder la totalité de son iode au charbon. Le liquide doit être porté de préférence à une température de 80°C environ, ce qui rassemble le charbon au fond du récipient. On le lave et on l'imprègne de carbonate de soude. On le brûle à basse température ; il laisse une cendre très riche en iode qu'on traite par un des procédés indiqués.

Par ce procédé on ne laisse pas plus de 10 à 20 g d'iode par m³ d'eaux mères.

L'électrolyse en vue de la formation de l'iodate se fait en système bipolaire, c'est-à-dire avec arrivée du courant à la première électrode, sortie du courant à la dernière ; une série d'électrodes intermédiaires jouent chacune le rôle d'anode sur une des faces et de cathode sur l'autre. Le liquide doit circuler en passant sur le haut d'une électrode pour descendre et passer par le bas de la suivante ; cette circulation est nécessaire pour empêcher l'iode de se déposer sur l'anode et pour le maintenir en dissolution. Le dégagement d'hydrogène cathodique favorise cette circulation, mais limite la densité du courant à 350 A/m², sous peine de provoquer une mousse abondante tendant à faire sortir

(1) M. HOLLARD n'a su que récemment que l'oxydation électrolytique de l'iode de potassium en milieu alcalin avait été indiquée par Pissarskewski et Telný en 1924 (*J. de Chimie industrielle russe*), c'est-à-dire 2 ans avant le dépôt de son brevet.

le liquide de la cuve. Cette limite est aussi imposée par la température élevée que provoquerait une densité plus forte et qui favoriserait la volatilisation de l'iode. Sans ces inconvénients le rendement augmenterait avec la densité du courant.

Le graphite utilisé comme électrode a l'inconvénient d'absorber de l'iode dans ses pores ; la magnétite (qui se trouve facilement à l'heure actuelle sous forme de plaque) est toute indiquée. Les côtés verticaux de l'électrode doivent présenter une étanchéité complète avec les parois de la cuve ; autrement des courants dérivés circulent dans l'électrolyte, dont la conductibilité est du même ordre de grandeur que celle de la magnétite.

La dépense d'énergie ne dépasse pas 1 kWh par kilogramme d'iode pour une densité de courant de 350 A/m² (sous 3 à 4 volts), avec des soudes très sulfurées. Avec des soudes moins sulfurées, le rendement est beaucoup meilleur.

On ajoute, une fois que les composés sulfurés ont été oxydés par le courant, du chromate de potasse (1 g par litre), dont on connaît l'influence (formation d'une couche d'oxyde autour de la cathode qui s'oppose à la réduction par l'hydrogène des composés oxygénés formés) (1).

M. HOLLARD a projeté ensuite un certain nombre de vues, relatives aux algues marines (habitat, développement, coupe, utilisation, alimentation, etc.).

M. DUFOUR répond comme suit à la note de M. GUTMANN, consécutive à la discussion de la semaine d'octobre 1928, sur les *fours à haute fréquence à étincelle et leur facteur de puissance*.

En réponse au deuxième point de la note de M. GUTMANN, concernant le rendement, on peut dire que le chiffre de 80 pour cent est facilement atteint par l'éclateur à soufflage coaxial, et même dépassé dans les usages où on peut se permettre un accouplement plus serré que d'habitude (cas des températures plus faibles). Il semble donc que l'élimination rapide des ions n'est pas suffisante pour augmenter la résistance de l'étincelle tant qu'il reste de l'énergie dans le circuit oscillant ; au contraire, ce soufflage intervient d'une façon très efficace lorsque, la décharge étant terminée, les condensateurs se rechargent par apport de l'énergie emmagasinée dans la self pendant la décharge.

En ce qui concerne le facteur de puissance (3^e point de la note de M. GUTMANN), je ne puis m'empêcher de trouver trop succinct le calcul présenté, et je serais vivement intéressé par un complément

(1) On trouvera des détails complémentaires dans A. HOLLARD, *Revue Générale des Sciences*, du 15 décembre 1926.

d'explications, en particulier sur la définition d'un facteur de puissance instantané, dont la notion est introduite dans cette note.

Quant à l'utilité de scinder en trois parties l'enroulement dans le cas de fours triphasés, elle ne se fait pas sentir spécialement pour les éclateurs soufflés, en effet :

1° Dans le cas des fours de grande puissance (à partir de 150 kW), il est possible de réaliser des fours à cuve dans lesquels la masse à chauffer est à l'extérieur de l'enroulement, le four comporte alors 3 ou un plus grand nombre d'éléments inducteurs. Dans le cas de fours de plus faible puissance, rien n'empêche de faire jouer à l'éclateur le rôle d'un commutateur de phase, en évitant régulièrement au moins l'un des disques de façon que les parties pleines occupent le $1/3$ du pas.

Si l'on a $3n$ secteurs pleins et si on fait N tours par seconde, la durée de passage en un point d'un secteur plein est :

$$t = \frac{1}{9Nn}$$

si on veut $t = \frac{1}{50}$ avec $n = 1$, on trouve $N = 5$ environ.

Chaque phase débite à tour de rôle pendant une période à condition que les 3 disques correspondants soient décalés d'un angle convenable, ce qui se réalise une fois pour toutes.

Enfin, en ce qui concerne les alternateurs, il y a lieu d'attendre que des renseignements plus précis soient publiés, mais il ne paraît pas certain que les pertes réunies de l'alternateur, du moteur, du four et des condensateurs n'égalent et ne dépassent les pertes des installations à étincelles.

Le facteur de puissance des alternateurs débitant directement sur un four est mauvais, il faut beaucoup de condensateurs et si ces condensateurs ne sont pas très bons, les pertes deviennent considérables.

Le prix des installations à alternateurs me semble aussi, jusqu'à plus ample informé, notablement plus élevé que celui des installations à étincelles.

Un alternateur à 2 000 p : s coûte seul 1 000 francs par kVA, aux environs de 20 kVA et 750 francs entre 100 et 200 kVA, il faut ajouter le moteur, les condensateurs, le four, les appareils de mesure, etc..., le prix d'un four à étincelles paraît largement dépassé.

Aux diverses remarques de M. DUFOUR, M. GUTMANN répond comme suit :

1° L'essai de calcul du facteur de puissance proposé est donné à ti-

tre de première approximation et ne vise qu'à montrer le sens dans lequel les divers éléments peuvent influencer.

2° Le dispositif denté présenté par M. DUFOUR, se rapproche des éclateurs tournants ordinaires.

3° Quant au prix des installations à alternateur, actuellement plus élevé encore que celui des installations à étincelles, il y a lieu de faire observer que le rendement métallurgique est aussi plus élevé que celui des fours à étincelles et justifie la préférence.

SÉANCE DU 1^{er} JUIN 1929. — M. ROLLET fait une communication sur la *théorie de l'accumulateur au plomb*, extraite de sa thèse de Doctorat (1).

M. CHARLES FÉRY, fait quelques remarques (1) au sujet de cette communication.

Une discussion s'engage sur des points particuliers.

M. CH. FÉRY pose sans la résoudre la question suivante : Comment le peroxyde peut-il subsister dans la positive, en présence du plomb, tel est le vrai mystère de la positive.

M. LIÉNARD demande si, en dehors des analyses, les capacités respectives correspondant aux divers paliers sont suffisantes pour attribuer une formule aux différents oxydes de Pb qui se réduisent, et si des hypothèses différentes sur la valence du Pb ne conduiraient pas à des résultats différents.

M. ROLLET. — La capacité dépend uniquement de la quantité d'oxygène actif contenu dans la positive.

M. DUFOUR. — D'ailleurs, le plomb ne participant pas au transport du courant, sa valence n'intervient pas dans les calculs de capacité.

M. O'KEENAN revenant sur la théorie de M. FÉRY et l'existence de Pb^{2+} , cite des mesures faites sur des piles dont la positive était en oxyde de Pb du commerce et donnait un f. é. m. comparable à celle de l'accumulateur ; il s'autorise de ce résultat pour douter encore de l'existence de Pb^{2+} .

UN MEMBRE. — C'est la capacité et non la f. é. m. qui dépend directement de la nature du peroxyde de la positive.

(1) La communication de M. ROLLET et les remarques de M. FÉRY, qui seront discutées à la Semaine d'Octobre prochain, paraîtront *in extenso* dans un prochain *Bulletin*.

4^e SECTION.

APPAREILLAGE. — CANALISATION. — DISTRIBUTION GÉNÉRALE. — TRACTION.

Président : M. DAGUERRE.

SÉANCE DU 26 AVRIL 1929. — M. DAGUERRE, Président, souhaite la bienvenue à M. VAN STAVEREN, Secrétaire de l'Union des Directeurs de Distribution d'énergie des Pays-Bas, venu spécialement de Arnhem, pour présenter sa communication sur *la détermination des courants de court-circuit à l'aide d'un modèle électrique* ⁽¹⁾.

M. DAGUERRE constate que les soucis constants causés aux exploitants par les court-circuits survenant dans leurs réseaux, seront un peu calmés, grâce à l'appareil de M. VAN STAVEREN.

Il lui demande s'il fait usage, chez l'abonné, des bobines de réactance pour réduire les court-circuits.

M. VAN STAVEREN répond que les bobines ne sont employées que dans les grandes sous-stations.

M. DAGUERRE ajoute que tous les auditeurs de M. VAN STAVEREN ont admiré, avec la valeur technique de sa conférence, la parfaite facilité avec laquelle il s'est servi de notre langue.

M. BUNET présente une communication sur *l'emploi des couteaux de sectionnement pour la rupture de la marche en parallèle des transformateurs*.

Lorsque des transformateurs se trouvent en parallèle des deux côtés sur des barres, on place généralement des disjoncteurs à huile des deux côtés et sur chacun des transformateurs. On peut aussi ne placer de disjoncteurs à huile, sur chaque transformateur, que d'un seul côté, en se contentant sur l'autre, d'un disjoncteur général; on fait ainsi une économie, sensible parfois. Tout en voulant recommander cette disposition d'une manière générale, l'emploi des disjoncteurs sur les deux côtés ayant certains avantages incontestables, il est intéressant de voir jusqu'où on peut aller dans cette voie.

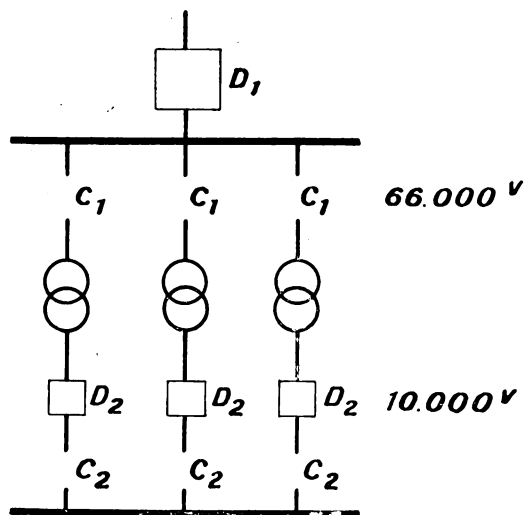
Dans une installation avec le primaire sous 66 000 V triphasé, 50 p : s, avec une puissance en trois usines hydrauliques atteignant 18 000 kW, et devant être augmentée, un poste abaisseur à 10 000 V renferme trois groupes de trois transformateurs monophasés, l'un de $3 \times 1\,500$ kVA, les deux autres de $3 \times 2\,200$ kVA, au total 17 700 kVA.

Les disjoncteurs sont en D (fig. 1); des couteaux tripolaires de type

(1) Cette communication est publiée au présent Bulletin, page 678.

normal, mais de très bonne construction, sont en C. Si les trois groupes de transformateurs sont en service et que la charge s'abaisse à celle de deux groupes, on peut en supprimer un. Des manœuvres sont encore nécessaires dans d'autres cas, car en réalité, il y a deux jeux de barres à 10 000 V avec deux départs, les deux jeux et départs étant, selon les moments, en parallèle ou indépendants.

Pour supprimer un groupe, on coupe purement et simplement les couteaux C_1 correspondants. Il se produit une étincelle qui n'a rien de dangereux, diminue et se coupe très rapidement sans laisser de traces de fusion dommageables. Ensuite, le transformateur restant à



vide et alimenté par le côté 10 000 V, on coupe le courant magnétisant au moyen du disjoncteur D_2 . Il ne faut pas faire l'inverse, et il est dangereux de couper le courant à vide au moyen de couteaux dès que la puissance des transformateurs est un peu grande; cela tient à ce que la tension s'établissant alors entre les deux parties de l'interrupteur est la tension totale.

Ces transformateurs ont pour caractéristiques :

Chute de tension $\cos \varphi = 1$ 2,1 pour cent,

Tension de court-circuit 10 à 11 pour cent,

Courant à vide 8 pour cent.

La charge de la sous-station a un facteur de puissance élevé ; les principaux appareils d'utilisation installés sont : 5 commutatrices de 2 500 kW, 2 commutatrices de 1 000 kW, 1 moteur synchrone de 1 000 kW, divers moteurs asynchrones de plus faible puissance, des chaudières électriques, des appareils de chauffage, d'éclairage.

Il nous a paru intéressant de signaler cette expérience, à cause de la puissance assez forte, de la tension élevée ; le fonctionnement de simples couteaux se montre meilleur que ce qu'on pourrait supposer ou craindre, en manœuvrant des groupes de 66 000 kVA. On a cependant l'impression qu'on ne pourrait augmenter beaucoup cette puissance avec sécurité, en conservant le même modèle de couteaux.

Pour couper le dernier transformateur, il faut opérer par le disjoncteur D_1 et non par C_1 . Il est facile, du reste, de combiner des voyants ou des enclenchements évitant les fausses manœuvres.

M. BUNET ajoute, par une note adressée ultérieurement : Certains collègues ayant énoncé quelques remarques et posé diverses questions à la suite de cette communication, nous ajoutons ces explications :

1° Des transformateurs étant en parallèle, lorsque l'on coupe un de ces appareils, il est exact qu'il s'établit définitivement, après rupture de l'arc, aux bornes de l'interrupteur, une tension permanente qui est assez voisine de la tension de court-circuit pour le courant qui traverse les appareils restant en service. Dans le cas cité, cette tension atteint environ 4 000 V sur chacun des couteaux.

Cette tension s'établit progressivement en même temps que le courant baisse par suite de l'addition d'une résistance en série, croissante et devenant assez élevée, celle de l'arc. Le courant dans l'arc et la tension qui le maintient tendent donc à se déphaser de moins en moins, l'une par rapport à l'autre. Ce déphasage est, pour une résistance d'arc intercalée donnée, d'autant plus faible que la charge des transformateurs est moins réactive.

Lors d'un passage du courant par zéro, l'arc assez allongé, cesse ; à ce moment la tension entre points de rupture est presque nulle aussi à cause de ce faible déphasage. Avant qu'elle ait reparu de nouveau en grandeur suffisante (fraction de quart de période), l'ionisation a disparu assez pour que le réamorçage de l'arc ne se fasse pas ; il cesse définitivement.

2° Si l'on coupe un transformateur à vide, on doit interrompre le courant magnétisant, souvent assez faible, mais qui atteint quelquefois le dixième du courant de pleine charge. Il est toujours déphasé de 90° ou presque, sur la tension. On intercale la résistance de l'arc, mais le déphasage entre le courant et la tension reste assez grand car, avec les longueurs ordinaires des couteaux, la résistance de l'arc n'est pas très considérable, à côté de la réactance totale du transformateur, ceci d'autant plus relativement que la tension est plus élevée. Quand le courant passe par zéro, la tension instantanée tendant à le faire con-

tinuer est assez élevée à cause de ce déphasage ; le rallumage se fait avec beaucoup plus de facilité que dans le premier cas.

C'est d'ailleurs ce que l'on observe souvent dans la soudure à l'arc. Pour obtenir un arc stable, qui ne se coupe pas de lui-même, il faut ajouter en série une bobine de réaction amenant un fort déphasage.

3° Une explication en d'autres termes peut être basée sur les remarques suivantes :

L'énergie accumulée dans une inductance correspond dans le premier cas à $\frac{1}{2} l I^2$, l étant l'inductance de dispersion et I le courant

total. Dans le second c'est $\frac{1}{2} L I_0^2$, L étant l'inductance totale et I_0 le courant à vide. Il faut pour comparer ces deux valeurs, comparer en réalité $U_{cc} I$ à $U I_0$. Mais $U_{cc} : U$ atteint souvent, et dépasse dans notre cas $I_0 : I$. On a donc plus d'énergie accumulée dans les fuites que dans le fer ; cependant la première rupture est plus facile que la seconde, l'expérience le montre. Il est vrai que, dans le cas nous occupant, on coupe ordinairement la mise en parallèle avec un courant au-dessous du courant de pleine charge. En général, on peut dire qu'il y a à peu près égalité entre les deux formes d'énergie accumulée.

Il faut toutefois remarquer qu'en courant alternatif, à chaque passage du courant par zéro, l'énergie accumulée tombe aussi à zéro. Le moment de la rupture est donc important.

4° Si nous prenons une bobine parcourue par un courant constant, à la rupture de ce courant, il faut compter sur la libération forcée d'énergie dès qu'on ne dispose plus de réservoir pour la recevoir.

Plaçons en parallèle deux bobines égales 1 et 2 ; le courant total, provenant d'une source de force électromotrice convenable, n'alimentant pas autre chose, est $2i$. Il y a dans chaque bobine $\frac{1}{2} L i^2$ accumulé, au total $L i^2$ pour les deux. Coupons le circuit de la bobine 2 et examinons deux cas extrêmes.

a) Les dispositions sont telles que le courant i dans la bobine 1 ne varie pas ; le courant total débité par la source tombe progressivement de $2i$ à i . Alors on a libération définitive de $\frac{1}{2} L i^2$ avec une proportion souvent élevée dissipée en chaleur dans la résistance ou l'arc intercalé. Cette énergie ne pourrait se rendre dans la bobine 1 qui n'en a que faire puisque son courant et son énergie accumulée restent invariables.

b) Le courant total débité par la source reste le même et égal à $2i$. La bobine 1, finalement traversée par ce courant, accumule alors :

$$\frac{1}{2} L (2i)^2 = 2L i^2.$$

L'énergie $\frac{1}{2} Li^2$ de la bobine 2, libérée, peut alors s'utiliser, plus ou moins complètement, et passer dans la bobine 1, la source fournissant le complément à $2Li^2$.

La rupture de la bobine 2 s'effectue en ajoutant avec elle une résistance r augmentée progressivement de 0 à ∞ . Pendant le temps dt l'énergie accumulée dans la bobine 2 décroît de :

$$Li_2 di_2 \quad \text{ou} \quad Li_2 \frac{di_2}{dr} \frac{dr}{dt} dt$$

pendant que la résistance, ou l'arc, dissipe $ri_2^2 dt$. La différence

$$i_2 \left[L \frac{di_2}{dr} \frac{dr}{dt} - ri_2^2 dt \right]$$

qui existe, peut maintenant, contrairement au cas a), passer dans la bobine 1 qui en a besoin.

La suppression d'un transformateur à vide peut être rattachée au cas a) ; la suppression d'un transformateur en parallèle avec d'autres des deux côtés, peut être rattachée au cas b). On se rend ainsi compte du moindre danger de l'étincelle dans le dernier cas.

M. NEU signale qu'une semblable installation existe en France à Albi ; des transformateurs de 60 000 volts ne sont pourvus d'aucun disjoncteur dans l'huile et les sectionneurs se maintiennent en parfait état. Ce genre d'installation présente une sécurité suffisante et est, d'autre part, très économique.

SÉANCE DU 31 MAI. — M. le Président donne connaissance de la note ci-après de M. CONGE, relative à la communication de M. BUNET, sur *l'emploi des couteaux de sectionnement pour la rupture de la tâche en parallèle des transformateurs*.

« Je me permets de signaler une installation importante réalisée entièrement suivant ce principe, et exploitée depuis dix-sept ans.

Il s'agit de l'installation de la « Energia electrica de Cataluna » à Barcelone, comprenant un transport de 175 km à 90 kV, avec des transformateurs de 5 000, 7 500 et 16 000 kVA de puissance apparente unitaire.

Tous les transformateurs élévateurs et abaisseurs sont munis seulement de couteaux de sectionnement sur le circuit secondaire, à 90 kV pour les élévateurs et à 11 ou 22 kV pour les abaisseurs. Les couteaux de sectionnement sur 11 ou 22 kV sont unipolaires, manœuvrés par perche du type ordinaire. Les 3 phases des circuits à 90 kV sont réunies mécaniquement et manœuvrables par transmission mécanique.

Ils ont été munis de petits godets à huile dans lesquels plongent les plots de contact et où se fait la rupture. La même disposition a été pré-

vue dans les postes de coupure pour la rupture de la marche en parallèle dans deux lignes de transport.

J'ai assuré pendant plusieurs années l'exploitation de ce réseau et je n'ai pas constaté que cette disposition, qui assure une économie de premier établissement très importante, réduisit sensiblement la souplesse de l'exploitation. Ces installations sont répandues en Allemagne.

J'ai réalisé pendant la guerre un schéma du même genre sur une plus faible échelle, dans la distribution d'énergie de la Poudrerie de Saint-Médard, mais dans ce cas la puissance des transformateurs (500 à 800 kVA à 220 V, au secondaire) était telle que l'intensité de l'arc était sensiblement la même si on coupait la mise en parallèle de deux transformateurs à 1/2 charge ou si on coupait un transformateur à vide.

A la Energia Electrica de Cataluna au contraire, à l'ouverture des sectionneurs sur transformateurs à vide, l'arc se maintenait, que cette fausse manœuvre eût été faite sur les sectionneurs à 11 kV ou sur les sectionneurs à 90 kV ».

M. DAGUERRE, au sujet de ce dispositif, exprime la crainte que l'économie réalisée de ce fait, ne soit une économie « dangereuse », en particulier sur les lignes souterraines.

M. BUNET répond avoir été surpris de la sécurité des manœuvres sur les puissances relativement considérables de l'installation qu'il a décrite.

M. DE PISTOYE exprime l'avis que les installations dont il s'agit pourraient être munies d'un dispositif de verrouillage. L'économie serait encore sérieuse.

M. FÉLIX note que, dans la région parisienne, certains exploitants ont ajouté, après coup, des interrupteurs dans l'huile à des installations de 50 à 200 kVA sous 15 kV, qui ne possédaient que des sectionneurs à commande par perche.

M. BUNET présente une communication, sur *l'Emploi des condensateurs sur les réseaux de distribution* ⁽¹⁾.

M. BARILLOT présente une communication sur *l'exploitation des sous-stations extérieures* ⁽²⁾.

(1) Cette communication devant être discutée à la prochaine « Semaine d'Octobre » paraîtra *in extenso* dans un *Bulletin* ultérieur.

(2) Cette communication qui sera discutée à la Semaine d'Octobre prochain, paraîtra *in extenso* dans un *Bulletin* ultérieur.

M. le Président se déclare absolument d'accord avec M. BARILLOT, au sujet des conditions d'emploi des postes extérieurs : en particulier au delà de 25 à 30 kV, ils permettent presque toujours de réaliser une économie.

M. BARILLOT précise que les installations extérieures, dont il a parlé, n'ont donné lieu à aucune difficulté d'exploitation. Elles n'ont nécessité aucun supplément de personnel sur celui qui aurait été nécessaire pour des installations intérieures.

M. DAGUERRE fait un parallèle entre les installations « charpentes métalliques » du P. O. et celles « béton armé » ou « béton centrifugé » du Nord-Lumière.

M. FÉLIX se déclare également d'accord avec M. BARILLOT. A son avis, il paraît difficile d'indiquer une tension « critique » à partir de laquelle les installations seront extérieures plutôt qu'intérieures. Pour les hautes tensions, il n'y a aucun doute à ce sujet. Pour les tensions moyennes c'est une question d'opportunité. M. FÉLIX cite à l'appui le cas d'installations à 5 kV qui ont été réalisées avec du matériel « extérieur »; diverses considérations ayant fait que l'installation extérieure était plus avantageuse.

5^e SECTION. — TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE. TRANSMISSION PAR ONDES

Président : M. REYNAUD-BONIN

SÉANCE DU 22 MARS 1929. — M. CHAUVEAU présente un appareil de la Maison Hatot pour la *remise à l'heure des horloges par lignes téléphoniques* et M. LAVET explique le fonctionnement de l'appareil en donnant aussi des indications sur les dispositifs en service aux mêmes fins, notamment à Strasbourg et à Hambourg ⁽¹⁾.

M. le Président reconnaît l'intérêt de la question et la très grande ingéniosité des moyens employés pour la résoudre, il doit signaler cependant les inconvénients de toute complication nouvelle introduite dans l'organisation des centraux téléphoniques et dans le service du personnel.

M. CHAUVEAU fait remarquer qu'il convient aussi de faire une distinction entre les grands établissements de l'Industrie, les Compagnies de chemin de fer, etc... pour qui la connaissance exacte de l'heure a

(1) La communication de M. LAVET a paru *in extenso* dans le *Bulletin* de juin 1929, page 639.

un intérêt primordial et les abonnés qui ne sont pas intéressés au même degré d'exactitude par la remise à l'heure de leurs horloges ; pour ces derniers, un « top » auditif donné, par exemple, tous les quarts d'heure suffirait et ne conduirait pas à une complication excessive.

M. BETHENOD a reçu de M. ECKERSLEY, ingénieur en chef de la British-Broadcasting corporation et de M. BRAILLARD, président de la Commission de l'Union internationale de radiophonie, deux lettres lui indiquant que les étrangers seraient disposés à adopter comme unité de fréquence le *Hertz* et lui demandant d'intervenir auprès du Comité électrotechnique français pour obtenir une décision conforme.

Après échange de vues, la Section décide de proposer au Bureau de la Société Française des Electriciens de faire connaître au Comité électrotechnique, « que la Société ne voit pas d'inconvénient à adopter un nouveau nom pour l'unité de fréquence, sous réserve toutefois de l'approbation des organismes officiels qualifiés pour se prononcer sur les unités de mesure ».

M. PAGÈS rend compte d'un article de M. CRUICKSHANK, présenté à l'I. E. E., sur la *télégraphie à fréquences acoustiques*.

L'auteur expose l'état actuel du développement des systèmes de télégraphie multiplex par courants de fréquences audibles dans les différents pays qui se sont intéressés à cette question ; il décrit succinctement les principaux appareils réalisés et donne de nombreux résultats expérimentaux obtenus, principalement en Grande-Bretagne, avec ceux-ci.

Il s'attache particulièrement, dans le cours de cet article, à justifier l'attitude du Post Office Britannique et s'efforce de montrer que ce dernier s'intéresse toujours activement aux derniers perfectionnements techniques, mais se voit contraint de discuter sérieusement les avantages économiques de chaque procédé.

Après un résumé historique de l'évolution de la technique télégraphique et un exposé rapide du problème de la transmission de signaux télégraphiques alternatifs, l'auteur énumère les qualités qu'on doit exiger d'un système de télégraphie harmonique.

Les filtres récepteurs doivent avoir une largeur de bande suffisante pour assurer une *reproduction correcte* des signaux, c'est-à-dire pour que les fréquences importantes représentées dans le « spectre d'amplitudes » du signal, mathématiquement représenté par une intégrale de Fourier, soient transmises.

Cette largeur de bande est également déterminée par la condition

que la durée des régimes transitoires n'excède pas l'ordre de grandeur de la durée des signaux les plus courts ; on reproduit en conséquence la longueur normale du signal élémentaire.

Afin d'éviter toute *interaction entre voies* il est nécessaire, lorsque les fréquences sont peu écartées, de supprimer à l'émission, au moyen de filtres, les composantes de fréquences susceptibles d'interférer avec les autres voies.

Enfin, la *vitesse de transmission* peut être altérée par les phénomènes de propagation sur les circuits (distorsion d'amplitude, distorsion de phases, distorsion non linéaire) ; il convient de limiter ou de compenser ces effets (contre-distorsion, élévation de la fréquence de coupure, compensateurs de phases...).

L'auteur décrit les systèmes suivants :

Siemens et Halske. — 6 fréquences dans chaque sens avec oscillateurs à triodes.

Western electric C°. — 12 fréquences dans chaque sens avec alternateur commun.

Système Japonais. — 4 fréquences et générateurs à lampes.

General Electric C°. — 6 fréquences dans chaque sens avec oscillateurs à triodes et diapasons.

Système Sell. — 4 fréquences dans chaque sens sur circuit 2 fils et générateurs à triodes.

L'auteur décrit ensuite de nombreuses expériences effectuées par les Services Techniques du Post Office et particulièrement sur un système duplex à une seule fréquence dans chaque sens (extensible à deux), mais avec vitesses de transmission exceptionnellement grandes.

Examinant enfin le rythme du développement des installations de télégraphie harmonique, en particulier en Amérique et en Allemagne, et cherchant à dégager des conclusions pratiques concernant particulièrement la Grande-Bretagne, l'auteur pense que l'introduction de tels systèmes serait souhaitable : une économie importante pourrait résulter de l'installation d'artères de communications puissantes, sans intermédiaires, entre centres importants, avec retransmissions vers des centres secondaires. Toutefois, la situation fortement déficitaire de l'exploitation télégraphique en Grande-Bretagne, doit être prise en considération et toute introduction de nouveaux systèmes soigneusement discutée au strict point de vue économique.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

PRODUCTION ET APPLICATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ

Applications de l'Electricité aux Mines, par Georges HACAULT, ingénieur des Arts et Manufactures, ingénieur E. S. E. — Encyclopédie d'électricité industrielle, directeur : A. Blondel, membre de l'Institut. — Grandes encyclopédies industrielles, J.-B. Baillière Un volume 16^{cm} × 24^{cm} de 552 pages et 251 figures. 1929 Editeur : librairie J.-B Baillière et fils, 19, rue Haute-Feuille, Paris — Don de l'éditeur

Dans les installations minières, la substitution de l'Electricité à la vapeur s'est faite d'abord dans les ateliers du jour, puis, la commande électrique individuelle s'est étendue aux ventilateurs, aux pompes et aux compresseurs.

La commande électrique des machines d'extraction fut plus lente à se développer, elle a fini par se généraliser à l'occasion de la reconstitution des mines dévastées et en raison de ses avantages économiques.

A l'heure actuelle, la vapeur a complètement disparu des sièges d'extraction du Nord et du Pas-de-Calais.

Dans la première partie de l'ouvrage, l'Auteur étudie les machines d'extraction électriques, leurs divers modes de commande ; l'appareillage mécanique et électrique, les dispositifs de commande, de freinage, de contrôle, de sécurité, les méthodes d'essai.

La deuxième partie se rapporte aux pompes, ventilateurs et compresseurs. Chacune de ces machines est étudiée au point de vue des conditions spéciales qu'elle doit remplir. Des caractéristiques de fonctionnement suivant les divers genres d'électromoteurs qui les commandent, enfin, du rendement dans les différents cas de la pratique.

RECHERCHES PHYSIQUES

Introduction à la théorie des quanta. Les équations de la mécanique et de l'électronique, par M. BOLT et C. SALOMON. 457 pages, 46 figures. Editeur : Gaston Doin et C^{ie}, Paris. (85 fr.).

Le terme introduction marque bien qu'il s'agit ici d'une étude préparatoire à la théorie proprement dite des quanta, à laquelle n'est consacré qu'un avant-propos, où se trouvent exposées, d'ailleurs très heureusement, les grandes lignes de l'évolution si rapide qui, à partir de l'atome de Bohr — Sommerfeld (1913), — et par la mécanique des matrices de Born et Heisenberg, se poursuit aujourd'hui d'une manière à la fois si active et féconde dans la nouvelle mécanique ondulatoire de Louis de Broglie et Schrodinger.

Même ainsi entendu, l'ouvrage comble une lacune en présentant, de questions d'analyse jusqu'à présent peu utilisées en dehors de la mécanique céleste, un exposé clair, illustré de nombreux exemples et bien adapté aux applications que ces questions ont reçues en physique au cours de ces dernières années.

Les deux premières parties (254 pages), portent ainsi sur les principes de la mécanique analytique, les équations de Lagrange et d'Hamilton, l'équation aux dérivées partielles d'Hamilton-Jacobi, les transformations de contact, la méthode de Staeckel, les systèmes multipériodiques, les invariants intégraux de Poincaré et l'invariance adiabatique.

La troisième partie (203 pages), est consacrée à la théorie classique de l'électron suivant Maxwell, Hertz et Lorentz, enfin à son extension en relativité restreinte, ainsi qu'aux applications limitées qui ont pu en être faites dans le domaine de l'atome d'hydrogène de Bohr.

Il est regrettable que certaines incertitudes notamment sur le signe à attribuer, suivant les chapitres, au symbole e de la charge de l'électron, rendent parfois la compréhension un peu difficile ; mais nous souhaitons que, tel quel, cet ouvrage opportun, qui porte sur un sujet difficile, trouve bon accueil auprès du physicien français.

Approximations dans les mesures physiques et dans les calculs numériques qui s'y rattachent, par E. COLARDEAU, professeur de physique au Collège Rollin. Un volume $14^{\text{cm}} \times 23^{\text{cm}}$ de 380 pages et 104 figures. 2^e édition, 1920. Prix : 20 fr. Editeur : librairie Vuibert, 63, boulev. Saint-Germain, Paris, 5^e.

La détermination de toute grandeur physique résulte de mesures qui comportent un certain degré d'approximation du fait de l'imperfection et de nos sens et des appareils de mesure qu'ils emploient dont nous disposons.

L'auteur étudie les approximations qu'il est possible d'atteindre dans la mesure des longueurs, des masses, des températures, des densités, des pressions, des dilatations, des chaleurs spécifiques, des indices de réfraction, des éléments caractéristiques, des systèmes optiques.

La première partie de l'ouvrage expose les méthodes de calcul qui permettent d'utiliser, dans les meilleures conditions possibles, les données bases de l'évaluation d'une grandeur inconnue.

La deuxième partie est consacrée à l'utilisation de ces données et des résultats auxquels elles conduisent pour l'établissement des lois physiques.

La troisième partie est consacrée à l'étude de divers instruments, envisagés au point de vue du degré d'approximation qu'ils peuvent fournir.

Theoretical and Experimental Researches on Electric Resistance Welding, by TAKEJI OKOMOTO, reprinted from the Memoirs of the College of Engineering Kyôto Imperial University. Vol. VI, n° 1. Kyôto, 1929. Un volume $19^{\text{cm}} \times 26^{\text{cm}}$ de 112 pages, 36 figures.

La soudure électrique par résistance fait l'objet de ce fascicule qui comprend des considérations théoriques et des tableaux de résultats se rapportant à la soudure des métaux ferreux et des divers alliages industriels. De nombreuses photographies donnant l'aspect micrographique des métaux après soudure, illustrent le texte.

ENSEIGNEMENT.

Cours de Physique à l'usage des élèves de Mathématiques spéciales, par J. LEMOINE, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et J. GUYOT, professeur au Lycée Louis-le-Grand. — Tome I. *Optique*. Un vol. $17^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}}$ de 384 pages et 353 figures dans le texte, 2 planches hors texte. 1928. Prix : broché, 40 fr. — Tome II. *Mesures. Chaleur*. Un vol. $17^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}}$ de 226 pages et 137 figures dans le texte. 1926. Prix : broché, 24 fr. — Tome III. *Magnétisme. Electricité*. Un vol. $17^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}}$ de 362 pages et 309 figures dans le texte. 1927. Prix : broché, 38 fr. — Tome IV. *Pesanteur. Mesures*. Un vol. $17^{\text{cm}} \times 25^{\text{cm}}$ de 200 pages et 142 figures dans le texte. 1928. Prix : broché, 18 fr. Editeur : librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris, 5^e. — Don de l'éditeur.

Ce cours possède les qualités de précision et de clarté qui caractérisent les ouvrages destinés à l'Enseignement.

De nombreuses figures, très claires, illustrent le texte ; enfin les Auteurs ont placé après chaque chapitre des énoncés d'exercices et de problèmes constituant d'excellentes applications des principes et des théories exposés dans le cours proprement dit.

Cours d'Electricité industrielle. Tome I : *L'Electricité dans la Science de l'Ingénieur*, par A. DEFRETIN, ingénieur en chef du service électrique à l'Association des Industriels du Nord de la France. Un volume in-8, 582 pages avec de nombreuses figures et 66 photographies hors texte. Paris, Hermann et Cie, éditeurs, 1929. Prix : broché, 95 fr ; cartonné, 100 fr

On ne peut mieux faire pour caractériser l'ouvrage de M. Defretin que de citer textuellement la préface de M. Janet :

« Le développement rapide de l'industrie électrique a posé, tant dans le domaine de la construction que dans celui de l'exploitation une série de problèmes de plus en plus complexes à mesure qu'augmentaient la variété et la puissance des applications mises en jeu. Les milieux intéressés ont d'abord été au plus pressé en utilisant les renseignements que leur fournissaient au jour le jour les revues techniques. Mais, bientôt, la nécessité d'un effort plus systématique s'est fait sentir et il a fallu envisager l'organisation d'un enseignement didactique des matières que la pratique avait peu à peu accumulées. Des cours d'électricité industrielle ou, comme on les a appelés, d'électrotechnique soit générale soit appliquée ont donc pris naissance de divers côtés. C'est à cette catégorie qu'appartient l'ouvrage que nous présentons aujourd'hui au public.

La nécessité de faire comprendre à des élèves des notions souvent difficiles ou délicates, l'ardent désir de leur être utile, que ne peut manquer d'éprouver tout maître digne de ce nom, impose à quiconque aborde la carrière de l'enseignement, une discipline spéciale et rigoureuse ; si l'on ajoute à cela que nulle critique n'est plus aiguë, parce qu'elle est proche et immédiate, que celle d'un auditoire jeune et désireux de s'instruire, on se rendra compte qu'un cours qui a franchi victorieusement ces obstacles a une valeur dont pourra profiter un public plus étendu. Telles sont les qualités que nous tenons à signaler dans l'ouvrage de M. Defretin : mélange judicieusement gradué de théorie et de pratique, nombreuses applications numériques, figures claires et simples, on y trouvera tous les éléments d'une bonne instruction électrotechnique, et c'est donc très sincèrement que nous lui souhaitons tous les succès qu'il mérite. »

L'ouvrage complet comprendra trois volumes. Il sera la reproduction des leçons que professe l'auteur depuis plus de huit ans, en deuxième et troisième année de Génie Civil à l'Institut industriel du Nord de la France à Lille. Les Tomes I et II dont les matières sont enseignées aux élèves mécaniciens chimistes et électriciens de cette Ecole, traitent du rôle joué par l'Electricité dans la Science de l'Ingénieur. Les matières contenues dans le Tome III sont enseignées aux élèves Ingénieurs électriciens.

Le Tome I est divisé en deux parties se rapportant la première aux *propriétés générales des circuits fixes des machines électriques* :

La deuxième à la *génération, la réception et la transformation de l'énergie électrique* :

Les photographies hors texte ont été mises à la fin du volume, elles représentent les appareils étudiés dans la deuxième partie de l'ouvrage.

Introduction à l'étude de la Physique théorique, par René FORTRAT, professeur sans chaire à la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble IV^e fascicule : *Electricité et Magnétisme*. Un volume 14^{cm} × 23^{cm} de 180 pages et 53 figures. 1929. Prix : 10 fr. Editeur : librairie scientifique Hermann et Cie, 6, rue de la Sorbonne, Paris, 5^e. — Don de l'éditeur.

L'ouvrage comprend quatre parties :

La première traite de l'électrostatique, c'est-à-dire des états d'équilibre électrique ; la seconde, du magnétisme ou des états d'équilibre magnétique.

L'électrodynamique et l'électromagnétisme réunissent la description des phénomènes de déséquilibre électrique, soit permanent, soit variable et de leurs relations avec le magnétisme ; ils font l'objet de la troisième partie.

La quatrième partie traite de la structure électrique de la matière. Un appendice est consacré à la théorie moderne des ions.

L'ouvrage, clairement rédigé, est d'une lecture facile.

IL Y A 30 ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 5 juillet 1899.

Présidence de M. VIOLLE, *Président*.

M. ABRAHAM expose, au nom de M. GUTTON, la vérification expérimentale qu'a faite celui-ci de l'identité des vitesses de propagation des ondes hertziennes dans l'air et le long des fils, Sarasin et de la Rive avaient établi cette identité en employant un résonateur : M. GUTTON a eu recours à un tube de Branly contenant des vis de fer.

Bulletin de juillet 1899.

Ce bulletin contient la cinquième partie de la communication de M. Maurice LEBLANC, sur la transmission et la distribution de l'énergie par les courants alternatifs. L'auteur décrit un redresseur à collecteur fixe et à balais mobiles ; un redresseur à collecteur mobile et à 12 bagues, un appareil redressant 1 600 A sous 250 V et accompagnant un transformateur à 48 circuits secondaires. Il expose le système de transport de force appliqué par le chemin de fer du Nord et appliquant la double transformation continu-alternatif-continu. Il indique le dispositif adopté pour annuler les courants déwattés produits par le transformateur et les conditions de stabilité du système. Il donne enfin ses conclusions, dont la principale est que, grâce à la facilité de conversion du courant continu en courant alternatif et inversement, l'emploi exclusif du courant alternatif s'impose pour les transports d'énergie à grande distance.

Une note, en annexe, traite du dimensionnement des transformateurs-redresseurs pour courants alternatifs monophasés.

L'Imprimeur-Gérant : Etienne CHIRON, Paris.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

RAPPORTS PRÉSENTÉS A LA SEMAINE D'OCTOBRE 1929 (1) :

- 1^{re} Section. — Les modèles mécaniques en électrotechnique, leur application aux problèmes de stabilité (M. DARRIEUS), p. 794.
- 2^e Section. — Croissance des végétaux en lumière artificielle (M. TRUFFAUT), p. 810.
- 3^e Section. — L'accumulateur au plomb (M. ROLLET), p. 832. — Observations (M. FÉRY), p. 839.
- 4^e Section. — Postes extérieurs (M. BARILLIOT), p. 843. — Emplois des condensateurs dans les réseaux de distribution (M. BUNET), p. 853. — La limitation des court-circuits dans les réseaux à haute tension (M. FALLOU), p. 883.
- 5^e Section. — L'évolution des procédés de fourniture de courant dans les centraux téléphoniques (M. B. SALOMON), p. 897.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS :

- a) Attribution pour 1929 de la Médaille Kelvin à M. André BLONDEL, p. 919.
- b) Attribution des prix Ancel et Cheux pour 1929, p. 919.
- c) Création d'une carte spéciale pour les Membres perpétuels de la Société, p. 919.

ERRATA :

- a) à la communication de M. DAUZÈRE sur « La foudre et les lignes électriques », p. 920.
- b) à la communication de M. MASSING sur « L'éclairage des grandes surfaces par projecteurs », p. 920.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

LES MODÈLES MÉCANIQUES EN ÉLECTROTECHNIQUE LEUR APPLICATION AUX PROBLÈMES DE STABILITÉ⁽¹⁾

par M. DARRIEUS.

Introduction : intérêt présenté par la réalisation des modèles mécaniques. — Conditions de réalisation. — Cas d'un système polyphasé symétrique. — Ligne polyphasée. Forme transposée du modèle. — Application de la forme transposée à une ligne polyphasée — Machine synchrone. — Machine d'induction. — Conclusion.

Le recours à des modèles mécaniques, cher aux physiciens de l'école anglaise, est intéressant à un double titre : il permet tout d'abord, en concrétisant des problèmes complexes, d'en faire mieux saisir à l'esprit la nature physique intime, et, laissant notamment une large part à l'intuition, la rend extrêmement féconde pour suppléer ou guider la théorie purement rationnelle, qui sans elle demeurerait souvent aveugle ou maladroite. De ce point de vue, la meilleure justification de cette prédilection pour les représentations mécaniques, réside dans le parti remarquable qu'en ont tiré certains physiciens comme MAXWELL et Lord KELVIN. Une aptitude merveilleuse à pressentir jusque dans ses détails le comportement des systèmes dynamiques les plus complexes, était chez ce dernier savant portée au plus haut degré, et constituait suivant J.-J. THOMSON, un des traits les plus remarquables de son génie. Sans doute, avait-elle été dans une large mesure développée par une longue pratique du calcul dont Lord KELVIN possédait toutes les ressources, mais la lecture de ses œuvres, notamment du célèbre traité de philosophie naturelle de THOMSON et TAIT, ne permet pas de douter que la maîtrise qu'il avait acquise dans le maniement des théories les plus élevées de l'analyse mathématique, devait beaucoup à un sens inné de la mécanique, développé ensuite par une pratique de l'observation et de l'expérience dans laquelle le maniement des modèles mécaniques a joué certainement un grand rôle.

C'est donc sous l'égide d'un grand maître que nous reprendrons l'étude de ces modèles, qui ont trouvé récemment un nouveau titre à retenir l'attention de l'ingénieur électricien par l'application qui en

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre, le lundi 21 octobre 1929.

a été faite au traitement pratique de problèmes de stabilité de grands réseaux de transmission, que leur complexité rendait presque inaccessibles au calcul.

Conditions de réalisation.

Il a été démontré par MAXWELL dans son célèbre *Traité d'Electricité et de Magnétisme*, que l'évolution d'un système électromagnétique, composé de n circuits indépendants, et dont l'état dépend, comme celui d'un système dynamique à n degrés de liberté, de n variables indépendantes, est régi par n équations de forme identique à celle des équations de LAGRANGE en mécanique, si les quantités d'électricité q débitées par chaque circuit sont assimilées aux variables généralisées, les courants i correspondant aux vitesses, le flux φ embrassés par chaque circuit, aux moments (ou quantités de mouvement) généralisées, l'énergie magnétique ou électrocinétique T à l'énergie cinétique, enfin l'énergie électrique U à l'énergie potentielle du système mécanique.

Le système électromagnétique est donc, de ce point de vue, toujours susceptible d'une représentation mécanique, et même, comme l'a souligné H. POINCARÉ, d'une infinité de telles représentations, puisque la seule condition de l'identité de forme des lois qui régissent le système et son modèle, consiste en la conformité des expressions qui leur correspondent pour les énergies potentielle et cinétique en fonction des variables généralisées et de leurs dérivées par rapport au temps.

Le modèle susceptible de représenter un système électrique donné quelconque, peut donc s'obtenir aisément en établissant une correspondance, d'une part entre les éléments du système et du modèle, d'autre part entre les modes d'assemblage à adopter pour ces éléments.

Par exemple, si la quantité d'électricité q qui joue le rôle de variable généralisée, est assimilée à un déplacement linéaire X , un condensateur pourra être représenté par un ressort dont la tension $x : A$, proportionnelle au déplacement de l'une de ses extrémités par rapport à l'autre supposée fixe, correspondra au potentiel, et dont l'élasticité A représentera donc la capacité C . De même, la self-inductance L sera représentée par une masse m dont l'énergie cinétique $\frac{1}{2} mv^2$, proportionnelle au carré de la vitesse v , correspondra à l'énergie de self induction $\frac{1}{2} Li^2$.

L'induction mutuelle de 2 circuits pourra également être représentée

en communiquant à des masses auxiliaires, à l'aide de balanciers, différentiels... etc... un mouvement dépendant à la fois des deux déplacements correspondants.

La résistance du circuit, qui détermine une chute du potentiel proportionnelle au courant, correspondra à une résistance proportionnelle à la vitesse, réalisable à l'aide d'un amortisseur ou cataracte.

D'autre part, la mise en parallèle de plusieurs éléments, entraînant la communauté de la différence de potentiel qui leur est appliquée, devra être représentée, dans le modèle mécanique, par l'égalisation, au moyen de balanciers convenables, des forces appliquées aux divers éléments correspondants. Corrélativement, la relation, exprimée par la première loi de Kirchhoff entre les quantités d'électricité débitées par les diverses branches qui partent d'un nœud, correspondra précisément, pour les déplacements correspondants, à la relation cinématique qu'implique l'emploi des balanciers.

De même, la mise en série de plusieurs éléments, entraînant la communauté de la quantité d'électricité qui les traverse, sera représentée par une liaison convenable des éléments correspondants du modèle mécanique, leur assurant à tous un même déplacement. Corrélativement, l'addition des forces électromotrices appliquées aux divers chaînons du système électrique et intervenant dans la deuxième loi de Kirchhoff, sera représentée par la composition, au nœud commun correspondant du modèle, des forces mécaniques appliquées à ses divers éléments.

Cas d'un système polyphasé symétrique.

La représentation d'un réseau quelconque, si compliqué soit-il, peut, suivant les principes ci-dessus, se réaliser avec un nombre convenable d'éléments se déplaçant tous suivant la même direction, Or par exemple mais, comme ces éléments sont le plus souvent susceptibles, sans complication, de recevoir un déplacement indépendant dans une direction orthogonale, Or par exemple, le même modèle est susceptible de représenter à la fois deux systèmes électriques semblables et indépendants, par exemple les deux circuits indépendants qui constituent un système diphasé à phases séparées, ou un système triphasé ordinaire, symétrique, sans neutre à la terre.

En ce cas les grandeurs, déplacements, forces... etc., qui caractérisent le fonctionnement du modèle, deviennent des vecteurs dont la

projection sur deux axes, rectangulaires dans le cas du diphasé, ou à 120° dans le cas du triphasé, donnent directement les quantités correspondantes pour les différentes phases du système électrique.

Ligne polyphasée.

Si la ligne, possédant inductance et capacité réparties, est assimilée au schéma (fig. 1), le modèle (fig. 2) consistera en une chaîne

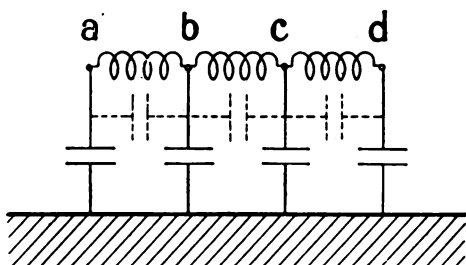


Fig. 1. — Schéma simplifié de ligne ou de transformateur avec inductance et capacité réparties.

de ressorts à boudin A, B, C, ... correspondant aux condensateurs en dérivation, et de flexibilité proportionnelle à leur capacité, tandis que les bobines de self seront représentées par des surcharges *ab*, *bc*, *cd*, ... de masse proportionnelle à leur self-inductance ⁽¹⁾.

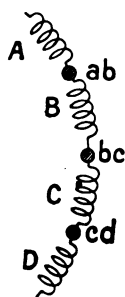


Fig. 2. — Modèle mécanique de ligne (représentation polyphasée).

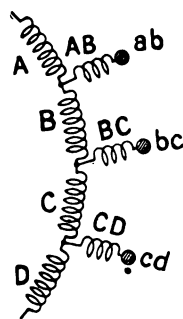


Fig. 3. — Modèle complété par la représentation de la capacité entre spires (transformateur).

(1) Il est même possible de faire entrer en ligne de compte la capacité entre spires ou entre bobines qu'amène à considérer la théorie de la propagation des ondes le long des enroulements de transformateurs, et qui correspond à des condensateurs en shunt AB, BC..., en reliant les masses *ab*, *bc*... à la chaîne, non plus directement mais par des ressorts AB, BC... (fig. 3).

En régime alternatif sinusoïdal permanent, et polyphasé symétrique, le modèle tournera comme un solide invariable et avec une vitesse angulaire constante ω autour d'un centre O, dont la distance aux divers points du système représentera la quantité d'électricité débitée au point correspondant du réseau, et qui n'est définie qu'à une constante près. La vitesse, dérivée par rapport au temps du déplacement, représentera donc le courant, tandis que les forces correspondront aux tensions et forces électromotrices.

Tandis que la première loi de Kirchhoff se trouve satisfaite identiquement, en vertu de la connexion même des éléments du modèle, qui, à tout sommet du réseau électrique associe dans le modèle une maille ou chaîne fermée, la deuxième loi appliquée à une maille du réseau, exprime l'équilibre des forces appliquées au nœud correspondant du modèle.

Par exemple, dans le cas du régime permanent, la convexité de la chaîne vers l'extérieur est déterminée en chaque nœud par la déviation (chute de tension) qu'impose à la tension dans la chaîne (potentiel) l'effet de la force centrifuge (chute inductive) sur la masse correspondante (inductance).

Si la ligne comporte, non plus seulement de la self-inductance pure, mais aussi de la résistance, l'effet en peut être représenté dans le modèle en adjoignant aux forces d'inertie que subissent les masses, des forces de frottement (chute ohmique) proportionnelle à la vitesse (courant), par exemple en assujettissant ces masses à se mouvoir dans un milieu visqueux.

Pour représenter correctement la capacité, les ressorts doivent avoir une bande initiale nulle pour une longueur totale nulle; mais si cette condition peut être aisément remplie à partir d'une certaine charge, en donnant au fil, avant enroulement, une torsion préalable convenable, la proportionnalité ainsi obtenue ne peut être réalisée que pour les tensions au moins égales à celle qui amène le décollement des spires, puisque pour les tensions moindres la longueur du ressort ne peut évidemment descendre en-dessous de la valeur minima pour laquelle toutes les spires se touchent.

Cette difficulté peut être évitée en développant le modèle en profondeur ou en décalant ses divers éléments le long de la chaîne dans le sens perpendiculaire au plan Oxy de la figure. Le déplacement supplémentaire suivant Oz ainsi introduit correspond à un degré de liberté nouveau, mais tout à fait indépendant des deux premiers, de sorte que le mouvement en projection sur Oxy reste le même que si le modèle

était demeuré plan. Par contre, la possibilité de donner aux ressorts, par une extension suffisante dans le sens Oz , une bande initiale supérieure à celle minima assurant la séparation des spires, permet à la loi de proportionnalité entre les projections sur Oxy de la tension et de la longueur totale du ressort, d'être satisfaite sans discontinuité, comme pour un ressort idéal sans encombrement, même lorsque les « condensateurs » sont complètement « déchargés » (projection nulle sur Oxy).

Autre forme de modèle, dite transposée.

Si la forme ci-dessus de modèle, que nous appellerons directe, est la plus naturelle, en ce qu'elle comporte une correspondance étroite des équations du mouvement, ainsi que des énergies potentielles d'une part et cinétiques d'autre part, elle présente cependant un certain nombre de défauts d'ordre pratique.

Tout d'abord, la nature de la relation qui régit les modes respectifs de connexion du réseau électrique et de son modèle, n'est pas très apparente, ni aussi simple qu'il serait désirable, en ce que, par exemple, un nœud du réseau correspond à une maille du modèle et réciproquement, de sorte que la transposition de l'un à l'autre est un peu malaisée.

En outre, tandis que les courants sont représentés par les vitesses, les tensions, qui sont souvent plus importantes à considérer dans les régimes transitoires (surtensions), correspondent aux forces dont les valeurs sont moins immédiatement sensibles ou apparentes que celles des déplacements.

Enfin les flux, qui constituent des grandeurs fondamentales, notamment dans l'étude du fonctionnement des machines, sont d'une représentation malaisée.

Le premier inconvénient pourrait être évité en recourant, pour la représentation mécanique, à un modèle hydraulique où les circuits seraient remplacés par des canalisations connectées entre elles de la même manière, remplies d'un liquide assez visqueux pour que le régime d'écoulement demeure toujours laminaire ou non turbulent, de manière à représenter correctement par la perte de charge l'effet de la résistance des circuits.

L'inertie du fluide jouerait le rôle de la self-induction (mais l'induction mutuelle serait plus difficile à représenter), tandis que l'élasticité des conduites et la compressibilité du liquide correspondraient à

la capacité. Mais si l'analogie des deux systèmes est immédiate, les mouvements du modèle qui ressemble trop à l'original sont presque aussi cachés et insensibles que dans ce dernier, de sorte que la substitution au réseau électrique, d'un appareil plutôt plus compliqué, ne présente guère d'intérêt pratique.

Par contre, il est possible de déduire, par une transposition convenable, de la forme directe de modèle, avec masses rigides et ressorts, que nous avons décrite, une autre forme corrélatrice ou réciproque qui présente certains avantages.

Dans cette nouvelle forme les déplacements représentent, non plus les quantités d'électricité, mais les impulsions électriques $Sudt$, intégrales par rapport au temps des potentiels aux différents points du réseau. Ces impulsions, homogènes à un flux, pourraient par exemple être mesurées par un flux-mètre connecté entre le point considéré et la terre; les tensions, qui sont les dérivées des impulsions, correspondent donc dans le modèle aux vitesses.

D'autre part, les forces représentent, non plus les tensions, mais les courants. Le travail mécanique, produit de la force par le déplacement, correspond toujours à l'énergie du système électrique, exprimée non plus comme le produit de la tension par la quantité d'électricité, mais comme le produit du courant par le flux ou l'impulsion.

L'inductance est maintenant représentée par une élasticité, et la capacité par une masse, de sorte que l'énergie électrique est, dans cette forme transposée, représentée comme cinétique et l'énergie magnétique comme potentielle, ce qui est moins correct au point de vue physique.

Par contre, grâce à ce que la première loi de Kirchhoff relative à un nœud s'exprime dans le modèle par une relation d'équilibre entre les forces correspondant aux courants qui y aboutissent, et à ce que la deuxième loi de Kirchhoff, relative à une maille, se traduit aussi dans le modèle par une relation de même forme pour le polygone d'impulsions correspondant, le mode de connexion du modèle n'est plus, comme dans la forme directe, réciproque de celui du réseau électrique, mais lui est semblable.

Grâce à cette similitude de forme, la parenté du modèle et du réseau est plus manifeste et l'interprétation des résultats rendue plus intuitive. En particulier les flux, ou les tensions qui leur sont proportionnelles à une fréquence donnée, et dont l'intérêt est en général prépondérant parmi les autres grandeurs électriques, sont fournis par la configuration même du modèle, dont la forme reproduit exactement celle du

diagramme des tensions. Mais il ne doit pas être perdu de vue que le modèle est beaucoup plus général, en ce que sa manière de se comporter fournit encore en régime quelconque, une image fidèle du fonctionnement du réseau, tandis que l'emploi du diagramme est limité au cas du régime permanent sinusoïdal.

Application de la nouvelle forme à une ligne polyphasée.

Le modèle d'une ligne avec inductance et capacité réparties demeure comme précédemment, constitué par une chaîne flexible, un ressort à boudin par exemple, uniformément chargée, mais où les rôles de la masse et de l'élasticité se trouvent seulement intervertis pour représenter maintenant respectivement la capacité et l'inductance.

La perditance ou conductance latérale peut également se représenter en astreignant la chaîne à se déplacer dans un milieu visqueux, mais la représentation de la résistance même de la ligne est par contre plus malaisée, comme l'était d'ailleurs celle de la perditance dans le premier modèle, et il en est de même pour la capacité longitudinale, shunt, ou entre spires, qui se laissait au contraire représenter facilement dans la première forme.

Il est heureusement admissible dans beaucoup d'applications, notamment pour les problèmes de stabilité, de négliger la résistance pour ne tenir compte en première approximation que de la réactance.

Tandis que dans la forme directe de modèle, les rayons vecteurs aux extrémités correspondaient aux courants (au facteur fréquence près), qui n'apparaissent guère en général comme données du problème, ces rayons vecteurs correspondent, dans la forme transposée, aux flux ou aux tensions qui leur sont proportionnelles, et qui dans beaucoup de cas, notamment de régime transitoire, peuvent être considérés comme approximativement constantes. Il en est ainsi rigoureusement lorsque la ligne est connectée à son extrémité à une machine très puissante bien amortie et munie de régulateur de tension, ou à un réseau de puissance infinie.

Le modèle d'une ligne de jonction reliant deux machines synchrones dont la réactance de fuites est négligée, prend alors la forme simple (fig. 4) de deux manivelles tournant autour du même axe, représentant respectivement les forces électromotrices de l'alternateur et du moteur synchrone et dont les manetons sont reliés par un ressort à boudin. S'il est tenu compte de la force centrifuge c'est-à-dire de la ca-

pacité par rapport à la terre, la chaîne élastique s'incurve vers l'extérieur, comme la courbe de la tension qui lui correspond dans le diagramme. Au régime dit sans déphasage ou sans onde de retour, pour lequel la tension et le courant demeurant, en négligeant les pertes,

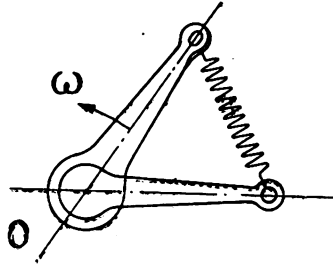


Fig. 4. — Modèle élémentaire de transport d'énergie illustrant la limite de stabilité.

constants le long de la ligne, le ressort dessine un cercle concentrique à l'axe.

Le modèle mécanique rend notamment intuitif ce fait que le couple ou la puissance maximum sont atteints lorsque le déphasage des tensions au départ et à l'arrivée, ou des manivelles menante et menée, atteint 90° . La chute de tension totale due à la réactance intercalée vaut alors $\pi : 2$ ou $\sqrt{2}$ fois la tension commune, suivant qu'il est ou non tenu compte de la capacité, tandis que la puissance limite est $\pi : 2$ fois plus grande dans le 1^{er} cas que dans le 2^e, grâce à ce que le facteur de puissance aux extrémités est alors 1 au lieu de $1 : \sqrt{2}$. Sous cette forme simple et dont l'analogie avec le problème électrique de stabilité est immédiate, nous avons proposé l'emploi d'un pareil modèle dans notre mémoire au Congrès International des grands Réseaux en 1925 ⁽¹⁾.

L'idée en a été reprise ultérieurement à la Société Westinghouse qui en a fait avec l'aide du cinématographe une application étendue à l'étude concrète de cas de stabilité relativement complexes, mettant en jeu un grand nombre de centrales différentes reliées par un réseau d'interconnexion ⁽²⁾. Le problème a d'ailleurs été simplifié en substituant à

(1) Quelques problèmes relatifs aux réseaux bouclés d'extension indéfinie. Paris 1925.

(2) A mechanical analogy to the problem of transmission stability. S. B. Griscom. *The Electric Journal*, mai 1926. Vol. XXIII, p. 230.

Quantitative mechanical analysis of power system transient disturbances. R. C. Bergvall and P.H. Robinson. *Journal of the A I E E*. Vol. XLVII, juin 1928, p. 419.

l'étude du régime variable à partir de l'état permanent de rotation, celle du régime variable à partir du repos; les effets de la force centrifuge demeurant négligeables, ne sont donc pas reproduits correctement, de sorte qu'il ne peut être tenu compte des effets de capacité comme dans le modèle plus complet que nous avons décrit, mais cette approximation est en général pratiquement suffisante dans le cas de lignes de jonction pas trop longues pour lesquelles la réactance est seule importante à considérer. L'étude des régimes transitoires dus aux défauts a été également simplifiée par la substitution au système réel dissymétrique de l'impédance dérivée triphasée symétrique, qui lui est équivalente au point de vue des effets moyens, et notamment de la puissance moyenne transmise, d'après la théorie de la décomposition des systèmes déséquilibrés en systèmes ou coordonnées symétriques. Mais le modèle complet se prête sans aucune complication à l'étude directe des défauts, sans exiger qu'aucun de leurs caractères réels soit négligé au point de vue notamment du régime transitoire, et même en tenant compte des ondes de décharge à front raide dues à la capacité.

L'effet d'un court-circuit direct entre phases le long de la ligne, sera par exemple représenté en assujettissant le point correspondant du ressort à se mouvoir à partir de l'instant initial du défaut, non plus circulairement autour de l'axe, mais le long d'une droite passant par la po-

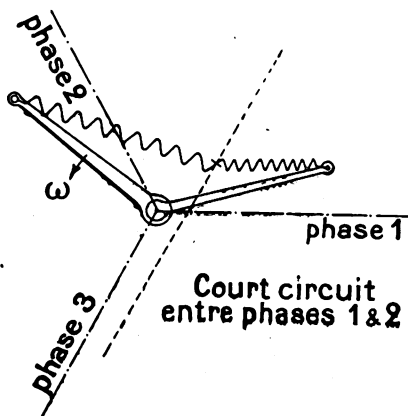


Fig. 5. — Condition équivalente à un court-circuit entre phases.

sition initiale et dirigée parallèlement à la bissectrice des lignes des temps de 2 phases considérées (fig. 5). Ce mode de liaison analogue à celui qu'utilise également une expérience bien connue de physique élémentaire pour illustrer la théorie de la polarisation de la lumière,

assujettit en effet les projections du point figuratif sur les deux lignes des temps à posséder des vitesses égales, ce qui correspond précisément à la condition d'égalité des tensions des 2 phases en court-circuit mutuel. Le court-circuit triphasé correspond à la suppression complète des deux degrés de liberté ou à l'immobilisation du point figuratif dans la position où il se trouve au moment initial.

L'influence des résistances du défaut et du réseau, sur la disparition progressive des termes transitoires exponentiels de la surintensité, peut se représenter en admettant que le point de défaut se trouve non plus parfaitement immobilisé, mais seulement fortement amorti, de manière qu'il puisse se rapprocher progressivement de l'axe et en demeurer très voisin en régime permanent.

Machine synchrone.

En laissant de côté la saturation, la représentation d'une machine synchrone suivant le diagramme simplifié de Joubert, consiste en un

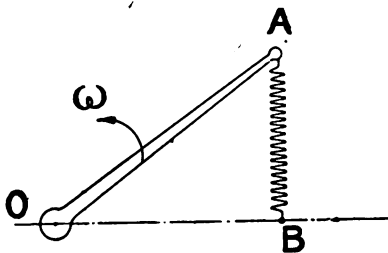


Fig. 6. — Modèle élémentaire d'alternateur suivant le diagramme de Joubert.

bras ou manivelle (fig. 6) de longueur proportionnelle au flux à vide correspondant aux ampères-tours d'excitation, tournant à la vitesse angulaire ω autour de l'axe O et portant à son extrémité A l'un des bouts du ressort AB figuratif de l'inductance totale L_1 de l'alternateur.

L'autre extrémité B doit être reliée soit directement à l'appareil figuratif du réseau de distribution soit au ressort figuratif de la ligne de transmission.

Par exemple, si le réseau est constitué par une résistance pure, la charge correspondante sera représentée en assujettissant la borne B de l'alternateur à se déplacer dans un milieu visqueux de manière à éprouver dans le plan du diagramme une résistance proportionnelle et

directement opposée à la vitesse. En régime permanent, comme cette dernière est perpendiculaire au rayon vecteur, il en est de même de la tension et de la direction du ressort AB ce qui correspond à un déphasage nul aux bornes de l'alternateur.

Si la machine est à pôles saillants, et présente ainsi, conformément au diagramme de Blondel, deux valeurs différentes de la perméance ou de la réactance, suivant l'axe du pôle et perpendiculairement à ce der-

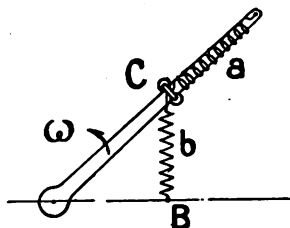


Fig. 7. — Modèle d'alternateur à pôles saillants (diagramme de Blondel).

nier, la différence correspondante des élasticités suivant ces deux axes pourra être réalisée (fig. 7) en partageant le ressort figuratif de l'inductance en deux parties a et b dont la première seule soit assujettie à rester dirigée suivant l'axe du pôle au moyen d'un coulisseau c mobile le long de cet axe sans frottement. L'élasticité dans le sens longitudinal, correspondant à la longueur totale du ressort $a + b$, sera ainsi plus grande, dans le rapport des réactances correspondantes, que celle dans le sens transversal qui ne dépend que de la portion b .

L'effet des courants de Foucault induits dans les masses polaires ou dans l'amortisseur coaxial à l'enroulement d'excitation, pourra être approximativement représenté en munissant le coulisseau c d'un amortisseur; une représentation plus complète de l'action de l'amortisseur pourrait d'ailleurs être obtenue en freinant un ou plusieurs points convenablement choisis du ressort représentant l'inductance de manière à séparer correctement de la réaction d'armature l'inductance de fuites; il serait possible également de tenir compte de la saturation par des artifices relativement simples (cames ... etc...) faciles à imaginer et sur lesquels nous ne nous étendrons pas.

Si, comme nous avons montré que l'exigeait la réalisation pratique à l'aide de ressorts à boudin, l'ensemble du modèle est largement développé en profondeur suivant l'axe Oz , et si nous nous limitons aux petits mouvements perpendiculairement à cet axe, l'inductance de l'alternateur pourra être représentée d'une manière encore plus simple

(fig. 8) à l'aide d'un simple lien, bielle ou fil de masse (capacité) négligeable, reliant l'extrémité de la manivelle figurative du flux interne de l'alternateur au ressort élastique et doué d'inertie qui représente la ligne de transmission. La tension préalable de ce ressort, qui résulte de l'extension du modèle dans le sens Oz , détermine, en effet, pour le

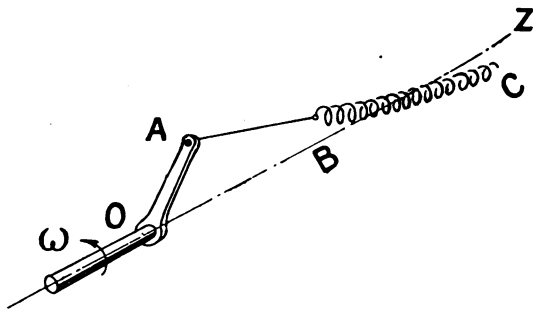


Fig. 8. — Autre forme de modèle d'alternateur à rotor lisse connecté à une ligne.

lien AB un effort de rappel vers la parallèle à l'axe, qui, pour de petits écarts angulaires, réalise précisément la condition requise de proportionnalité au déplacement.

L'inégalité des réactances longitudinale et transversale pourra de

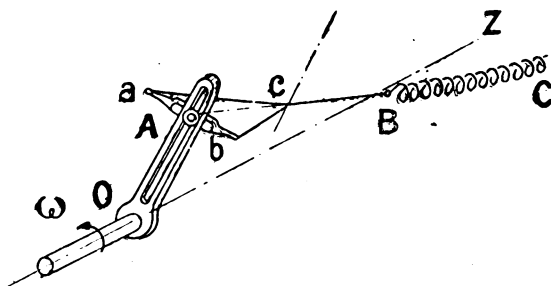


Fig. 9. — Forme correspondante pour un alternateur à pôles saillants.

même être représentée par le dispositif de la figure 9, dans lequel le triangle de fils abc assure la différence des couples de rappel qu'éprouve le point B sous l'influence de la tension du ressort de ligne BC, autour des axes ab (réaction longitudinale) et Cc' (transversale).

L'inductance pourrait encore être représentée par une lame flexible encastrée en m sur la manivelle, et qui, isotrope ou d'égale flexibilité dans tous les sens dans le cas des rotors lisses (diagramme de Potier),

présenterait au contraire sa plus grande largeur dans le sens ab et sa plus grande flexibilité suivant le rayon, dans le cas de machines à pôles saillants.

Moteur d'induction.

Toute la théorie du moteur d'induction, conduisant au diagramme du cercle le plus général (Blondel, Heyland, Ossanna) ⁽¹⁾ est contenue dans les deux relations fondamentales ci-dessous, valables même en régime transitoire.

Désignons par L_1, L_2, M les coefficients de self inductance totale et de mutuelle inductance du stator et du rotor, $N_1 = \sigma L_1$ $N_2 = \sigma L_2$ les coefficients d'inductance de fuites totales ramenées respectivement à l'un et à l'autre enroulement, Φ_1 et Φ_2 les flux réels totaux embrassés

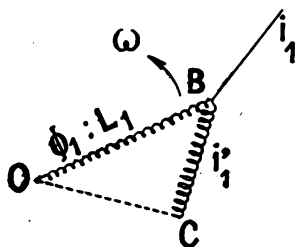


Fig. 10. — Modèle équivalent de moteur d'induction.

respectivement par ces enroulements, R_2 la résistance par phase du rotor, enfin i_2 le courant au rotor.

$$\begin{cases} \Phi_2 = N_2 i_2 + \frac{M}{L_1} \Phi_1 \\ -\frac{d\Phi_2}{dt} = R_2 i_2. \end{cases}$$

La deuxième équation exprime (fig. 10) que la vitesse relative $\frac{d\Phi_2}{dt}$ du point figuratif du flux Φ_2 , par rapport à un système de référence tournant dans l'espace à la vitesse du rotor (et par rapport auquel le modèle tourne donc à la vitesse du glissement) est proportionnelle à la tension $\dot{\Phi}_2$ du ressort BC représentant l'inductance de fuites du moteur.

(1) La prise en considération de la résistance du primaire s'introduit dans cette théorie presque sans complication, quoi qu'il n'en soit pas de même pour le modèle.

En régime permanent, les deux vecteurs OC et CB sont donc orthogonaux.

En vue de rendre plus aisé le raccordement du modèle du moteur à celui du réseau ou de la ligne, il convient de ramener toutes les grandeurs du rotor au stator en multipliant par le rapport de transformation $\frac{L_1}{M}$. En tenant compte de ce que :

$$N_2 L_1 = N_1 L_2 \quad \text{et} \quad M^2 : L_1 L_2 = 1 - \sigma$$

et en posant : $i'_1 = \frac{M i_2}{L_1}$ les deux équations prennent la forme :

$$\frac{L_1}{M} \Phi_2 = \frac{N_1}{1 - \sigma} i'_1 + \Phi_1$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{L_1}{M} \Phi_2 \right) = -R_2 \frac{L_1}{L_2} i'_1.$$

Il ne reste plus qu'à introduire le courant magnétisant $\Phi_1 : L_1$ sous la forme d'un ressort de flexibilité L_1 reliant O à B, pour achever la représentation mécanique du schéma équivalent classique du moteur d'induction.

La résistance rotorique, qui pourrait en principe être représentée par le déplacement de l'extrémité C à travers un milieu visqueux tournant avec le rotor, sera pratiquement réalisée, par exemple, en reliant l'extrémité C de l'inductance à un bras OC suffisamment allongé dans le

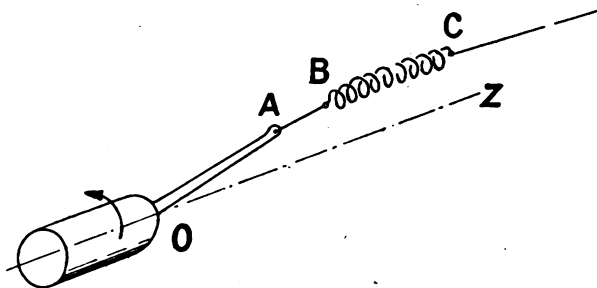


Fig. 11. — Autoexcitation du moteur asynchrone sur une ligne avec capacité (l'amortisseur tournant O, qui représente le rotor, freine également les deux libertés du bras OA autour de son centre O).

sens Oz pour que l'effort de rappel dû à la tension du ressort dans cette direction soit négligeable, et en freinant dans les deux directions Ox' Oy' les déplacements transversaux de ce bras par rapport au système Ox'y' tournant avec le rotor. Cet amortissement du mouvement relatif pourra, par exemple, être obtenu en munissant le bras OC au delà de la rotule O d'un prolongement pénétrant dans un récipient tournant avec le rotor, et rempli d'un fluide suffisamment épais (graisse consistante, valvoline, mélasse, brai... etc).

Un pareil modèle (fig. 11 se prêterait particulièrement à l'étude des conditions d'auto-excitation du générateur asynchrone sur ligne à forte capacité. L'état d'ouverture du circuit de la ligne à son extrémité opposée à la génératrice sera représenté en assujettissant l'extrémité correspondante du ressort à se mouvoir sans résistance dans un plan normal à l'axe O (composantes nulles de la tension du ressort dans le plan Oxy), c'est-à-dire pratiquement en reliant cette extrémité à un fil léger amarré en un point de l'axe suffisamment éloigné.

L'auto-amorçage synchrone des machines à pôles saillants pourra de même être étudié avec ou sans amortissement sur le modèle de la figure 8, et il sera possible, notamment, de mettre en évidence que l'auto-excitation peut ne pas se produire en l'absence de saturation ou de cause perturbatrice suffisante comme l'alimentation rémanente, si la vitesse critique est franchie assez rapidement.

CONCLUSION :

Le cadre de cette étude ne nous permet pas d'aborder une série de questions fort intéressantes connexes de la théorie de ces modèles, notamment les rapports réciproques des deux formes directe et transposée que nous avons décrites ⁽¹⁾, la parenté étroite de cette corrélation avec le mode de correspondance réciproque que, dans un mémoire qui paraît d'ailleurs être resté assez inaperçu ⁽²⁾, H. Sire de VILAR a mis en évidence en 1901 entre les réseaux ⁽³⁾, enfin les points de contact très suggestifs de ces problèmes avec la théorie des figures réciproques de Maxwell, et les transformations par polaires réciproques.

Mais nous espérons avoir montré par quelques exemples, suffisants pour illustrer les principes essentiels, et qu'il serait aisé de multiplier, tout le parti que l'électro technique peut tirer, tant au point de vue didactique qu'au point de vue pratique, d'un emploi judicieux des modèles mécaniques.

(1) Il est assez remarquable de retrouver respectivement dans ces deux types de modèles, les deux couples de grandeurs uq et $i\phi$ qu'amène à considérer la théorie générale de la puissance réactive dans ses rapports avec l'« action » de la mécanique analytique.

(2) La dualité en électrotechnique. H. Sire de Vilar. *L'Eclair. Electr.* t. XXVII, pp. 252, 278 ; t. XXVIII, p. 237.

(3) Tout nœud d'un réseau correspond à une maille du réseau conjugué et réciproquement (la connexion en triangle à celle en étoile), de même le courant de l'un à la tension de l'autre, la résistance à la conductance, l'inductance à la capacité, la 1^{re} loi de Kirchhoff à la 2^e loi de Kirchhoff... etc.

La forme directe du modèle d'un réseau n'est autre que la forme transposée du modèle du réseau conjugué, et réciproquement.

CROISSANCE DES VÉGÉTAUX EN LUMIÈRE ARTIFICIELLE ⁽¹⁾

par M. G. TRUFFAUT

Historique des expériences anciennes. — Expériences de l'auteur : qualité de la lumière, valeurs trouvées par Doyarenko pour le quotient technique de l'utilisation de l'énergie solaire par les plantes, valeurs trouvées par l'auteur pour l'utilisation de l'énergie des lampes. — Inconvénients de la chaleur dégagée par les lampes ; emploi de lampes mobiles ; dispositifs adoptés ; expériences sur les tabacs et les avoines, les fraisiers, les rosiers. Actions des rayons ultra-violets. — Conclusions.

L'influence de la lumière solaire sur la croissance des plantes, a frappé depuis la plus haute antiquité l'esprit des observateurs. Peu à peu, au fur et à mesure que la science expérimentale s'est constituée, les physiologistes se sont efforcés de rechercher la valeur exacte de cette influence et dans quelles limites elle pouvait s'exercer. L'étude de la lumière du soleil dans ses rapports avec la germination, la fonction chlorophyllienne et les divers phénomènes de la vie des végétaux, s'est développée avec rapidité depuis la fin du XVIII^e siècle, jusqu'au milieu du siècle dernier. SÉNEBIER, de HUMBOLT, INGEN HOUSS, de SAUSURE, HUNT, NOBBE et surtout JULIUS SACHS ont le plus contribué à mettre en évidence l'étude des phototropismes. L'ouvrage fondamental de SACHS donne sur ces questions une remarquable vue d'ensemble ; l'étude de la lumière blanche dans ses rapports avec la vie des plantes était achevée dans ses grandes lignes.

Mais, en même temps, les botanistes apprenaient que les diverses radiations composant la lumière solaire se comportaient différemment et possédaient chacune leurs caractères physiologiques propres. Les travaux de SÉNEBIER, ZANTEDESCHI, MORREN, SACHS, PIEPER, HUNT, FAIVRE, ADRIANOVSKY, C. FLAMMARION, P. BERT, KRAUS, WEBER, A. MAYER, WIESNER, DANGEARD, TEODORESCO, TIMIRIAZEFF, etc., ont traité de l'influence séparée de chacune des lumières simples. Il résulte de leurs multiples expériences un grand nombre de résultats souvent contradictoires.

La mise en évidence des rayons ultra-violets a bientôt suscité des

(1) Cette communication sera discutée à la Semaine d'octobre, le mardi 22 octobre 1929.

recherches nouvelles. SACHS, puis CAS. de CANDOLLE, conclurent de leurs expériences que la suppression des rayons ultra-violetts retarde ou empêche la floraison et que ceux-ci exercent sur le développement des plantes une action heureuse. LENDNER confirme ces résultats. Par contre, C. FLAMMARION conclut de ses expériences que ces radiations sont nuisibles à la formation des fleurs. L'action stérilisante de ces rayons, mise en évidence en 1877 par DOWNS et BLUNT, fut confirmée par les travaux de POTTHOFF, MASHIMO, BAZZONI, BURGE, NADSON et PHILIPPOT. Nous reviendrons en détail sur cette importante question.

Les progrès de la physique moderne, le développement de la lumière électrique, ont permis d'utiliser des sources nouvelles de lumière dont les spectrogrammes, faciles à reproduire, permettaient, par une méthode nouvelle, de comparer les différents résultats obtenus. En possession de sources fournissant une gamme de radiations extrêmement étendue, c'est dans une direction nouvelle, avec une méthode autrement précise et fructueuse, que de nouvelles expériences ont pu être entreprises, depuis 30 ans surtout.

Les précurseurs dans ce domaine ont été HERVÉ-MANGON (1861) et PHILLIEUX (1869) puis SIEMENS (1880-91) et DÉHÉRAIN (1881-91) qui utilisèrent la lumière de l'arc électrique durant la nuit, et la lumière solaire durant le reste de la journée. Les résultats contradictoires ont été résumés par MONTPELLIER (1892). Les rayons directement émis par l'arc électrique se sont montrés nuisibles aux végétaux soumis à leur action à courte distance.

G. BONNIER, dans ses expériences devenues classiques, a employé la lumière de l'arc électrique, d'une façon, soit continue, soit discontinue et étudié les modifications anatomiques en résultant et comportant surtout une simplification de structure d'une part, une meilleure répartition et un plus grand développement de chlorophylle d'autre part.

Les essais de BONNIER, entrepris dans les conditions exposées plus haut, lui ont permis de formuler un certain nombre de conclusions quant aux modifications anatomiques apportées par la lumière électrique.

Il est arrivé aux conclusions ci-après :

1° On trouve des différences de structure pour une même espèce selon qu'il s'agit de l'éclairement électrique continu ou de l'éclairement solaire, normalement discontinu.

Les plantes cultivées en lumière électrique *continue* présentent les caractères suivants :

- a) chlorophylle plus développée et mieux répartie dans les cellules ;
- b) structure du limbe foliaire simplifiée ;
- c) structure de la tige simplifiée.

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus en lumière solaire *discontinue* normale.

Ainsi, la lumière électrique continue produit, d'après les essais de BONNIER, « un étiolement vert » que caractérisent :

- 1° La surabondance de chlorophylle,
- 2° la simplification de structure.

II°. — En modifiant l'intensité de l'éclairement électrique, BONNIER a observé : que la différenciation des tissus augmente avec l'intensité de la lumière électrique discontinue, mais qu'elle reste inférieure à celle observée à la même intensité, en lumière électrique continue.

III°. — Les plantes alpines, cultivées à la lumière électrique continue peu intense, ont acquis une structure à peu près identique à celle qu'offrent les mêmes espèces récoltées dans les stations arctiques, alors que normalement les plantes alpines possèdent des feuilles moins épaisses et une structure plus compliquée que les espèces arctiques.

De nombreux expérimentateurs étrangers ont poursuivi le problème. HENDRICKS et R.-B. HARVEY, ont soumis des plantes à la lumière artificielle continue et déterminé l'intensité lumineuse à laquelle la floraison apparaît. Les résultats varient avec les espèces végétales employées.

ADAMS a montré l'influence heureuse de la lumière électrique jointe à l'éclairement du jour.

SCHANS (1919) a repris, dans des serres appropriées, l'étude des diverses radiations monochromatiques, pour lesquelles la lumière rouge lui a donné les résultats les plus favorables, en ce qui concerne le développement des concombres, fuchsias, chrysanthèmes, lobélías, bégonias et oxalis, alors que pour les pommes de terre et les betteraves rouges, l'optimum se trouve au niveau de la lumière bleue-violette. D'autre part, les rayons de courte longueur d'onde, notamment les ultra-violets, se montrent nuisibles à la croissance des plantes.

Les expériences incomplètes de SCHANS ont été reprises soigneusement par POPPS (1926), qui utilise la lumière solaire de laquelle certaines radiations étaient éliminées par l'emploi de différents verres. Un spectrographe de quartz servait à la détermination des longueurs d'onde

transmises par chaque verre. Une lampe à vapeur de mercure en quartz et une lampe de 200 W étaient utilisées comme sources de lumière, la première en raison de sa richesse en ultra-violets, la dernière possédant un spectre continu qui permettait la détermination exacte des limites d'absorption dans la région visible du spectre.

Afin de déterminer l'intensité relative de la transmission des glaces utilisées pour les différentes serres, POPP utilisa l'illuminomètre de MACBETH. La serre témoin qui transmettait pratiquement la totalité du spectre solaire, était protégée par un écran afin de réduire son intensité lumineuse à une valeur comparable à celle des autres serres ne recevant qu'une fraction du spectre.

Les importants résultats qui découlent des expériences de POPP sont les suivantes :

1° soumises à une lumière dont toutes les radiations de longueur d'onde plus courtes que 5 290 Å ont été éliminées, les plantes offrent un accroissement plus considérable des tiges, qui sont plus grêles, moins ramifiées, à feuilles plus ou moins roulées, à chlorophylle normale, à anthocyanine réduit, à parois cellulaires plus minces ; la floraison est retardée, le nombre de fleurs diminué, les grains et les fruits se développent mal, la teneur en azote total est plus élevée ; les plantes ont un aspect étiolé.

2° soumises à une lumière dont les longueurs d'onde plus courtes que 4 720 Å sont éliminées, on obtient les mêmes résultats que ci-dessus.

3° Quand, seuls, les rayons ultra-violets sont éliminés, les différences avec les plantes normalement développées à la lumière du jour, étaient très peu marquées.

La conclusion fondamentale de Poppe est que, si les rayons ultra-violets ne sont pas indispensables, le bleu-violet de la fin du spectre est nécessaire.

HARVEY a employé des lampes Mazda de 200 à 1 000 W à filament de tungstène, en atmosphère d'azote, fixées au plafond et munies de réflecteurs semi-sphériques. Les 3 200 W fournis, émettaient un flux de 67 000 lumens, dont 60 pour cent étaient utilisés. La température était de 14° C.

Les plantes utilisées — sauf les choux — se sont développées normalement, quoique un peu plus petites que les témoins.

La fructification a été normale.

Emploi des lampes.

HARVEY : lampes Madza 200 à 100 W fil de tungstène, atmosphère d'azote.

HUBBEN : lampe de 1 500 W, munies de filtre coloré.

ARTHUR CROCKER, MAXIMOFF, etc... : lampes de 1 000 W.

Ces divers expérimentateurs ont employé des lampes dont la puissance, qui peut atteindre 2 000 W est telle, que la chaleur dégagée est très forte. Or, les expériences faites notamment par les Russes, ont montré que c'est entre 15 et 25° C environ, que les conditions thermiques se montrent les plus favorables à l'heureuse action de la lumière intense sur la végétation.

Le dispositif de lampe à poste fixe dans lequel le brassage de l'air n'intervient pas et qui, par suite, favorise grandement l'élévation de la température du laboratoire et les brûlures sur les feuilles, est donc fautif. D'autre part, si on utilise des filtres éliminant les rayons calorifiques, l'intensité lumineuse devient insuffisante.

Un certain nombre des auteurs que nous avons cités plus haut ont pu obtenir la maturation complète des grains de blé, d'orge, de sarrazin. Mais les végétaux obtenus, restaient, en général, ou chétifs ou étiolés; et offraient aussi bien pour leur aspect que pour les particularités anatomiques de leurs tissus, une grande homologie avec les végétaux venus à l'ombre.

EXPÉRIENCES DE L'AUTEUR.

Tel était l'état des connaissances sur l'influence de la lumière artificielle sur la végétation, lorsque nous l'avons abordée, il y a deux ans environ.

L'étude de la bibliographie réunie sur la question, les divergences entre les résultats obtenus par les divers auteurs, l'introduction dans la littérature de récentes données fournies par les savants russes, nous ont fait apparaître les défauts des expériences entreprises jusqu'ici.

Nous avons été ainsi amenés à considérer le problème d'une façon plus rationnelle, en mettant en évidence les facteurs les plus importants qui sont :

- 1° la qualité de la lumière ;
- 2° son intensité et sa distribution ;
- 3° le choix de la plante.

Qualité de la lumière. — La question de la qualité de la lumière nous entraînera à exposer, sommairement, l'un des points les plus importants du problème : le rôle des radiations ultra-violettes.

Avant les expériences de Miss ELTINGE et les nôtres qui paraissent préciser la question, l'opinion des auteurs était divisée. Des expériences personnelles qui datent déjà de plus d'un an et dans lesquelles nous avons utilisé comme filtre pour la lumière solaire des verres spéciaux (Renovic, Pyrex), laissant passer une quantité relativement élevée de radiations ultra-violettes et notamment des rayons appelés « rayons vitaux » (ceux qui sont compris entre 2900 et 3100 Å, nous avaient amenés à cette conclusion première que les radiations ultra-violettes peuvent, dans quelques cas d'une luminosité solaire faible, être nettement favorables au développement des plantes (salades, anthémis), mais que, dans d'autres, les effets sont nuls ; des brûlures atteignirent même parfois plus ou moins gravement les plantes.

D'autre part, les travaux de DOYARENKO (1924), sur l'utilisation de l'énergie solaire dans les cultures agricoles, nous donnaient d'utiles indications, notamment par la notion de ce qu'il appelle le quotient technique moyen de l'utilisation de l'énergie solaire.

DOYARENKO a déterminé pendant trois années consécutives :

1° la valeur calorifique des récoltes de certaines plantes rapportée à leur poids sec.

2° la valeur de la radiation solaire reçue par mètre carré sur le sol au cours de la période de végétation.

Divisant par le nombre de calories solaires reçues celui des calories contenues dans la matière sèche de la récolte produite sur ce mètre carré, il obtint un pourcentage qu'il nomma le quotient technique moyen de l'utilisation de l'énergie solaire par les plantes. Il souligne que ce quotient pratique se trouve de beaucoup en dessous du quotient théorique de l'utilisation physiologique des radiations solaires par les plantes. Ce quotient, en moyenne, varie de 2 à 2,8 pour cent pour la plupart des plantes, atteignant par exception 3,6 pour cent pour le lin et même 4,8 pour cent pour le lupin. Le quotient moyen de l'avoine est de 2,74 pour cent.

Dans nos expériences de Versailles de 1928-1929, que nous décrivons plus loin, nous avons réussi à amener à maturité l'avoine cultivée sous la lumière artificielle de lampes à filaments de tungstène.

Nous avons, d'autre part, déterminé le nombre de grandes calories reçues sous forme d'énergie radiante, émise par nos lampes sur une

surface sur laquelle avait poussé l'avoine au cours des 1010 h. que dura sa végétation.

Il était égal à 45 813 600 calories.

Ayant pesé la récolte d'avoine, nous avons calculé sa valeur calorifique nous basant sur celle, moyenne, déterminée par DOYARENKO, soit 4 400 calories par kilogramme de poids sec.

De cette façon, nous pouvons établir que le coefficient d'utilisation de la lumière électrique des lampes de tungstène (dans le cas de nos expériences), a été de 2,25 pour cent. Il reste donc très au-dessous des coefficients solaires les plus bas indiqués par DOYARENKO pour l'utilisation par l'avoine de l'énergie solaire, son chiffre minimum étant 2,65.

D'après DOYARENKO, la quantité d'énergie solaire reçue par kilogramme de récolte en Russie dans la région de Moscou, pendant la période végétative, a été, pour le seigle et le blé de 3 900 à 3 273 calories, pour le lin et le lupin entre 2 161 et 1 586 calories.

La valeur calorifique des plantes, c'est-à-dire le nombre de grandes calories contenues dans un kilogramme de leurs matières sèches, est exceptionnellement haute pour le lin qui représente 6 552 calories et le lupin 5 191 ce qui est dû, probablement, à la haute teneur en graisse du premier et en protéine du deuxième.

De nombreuses autres plantes, graminées, pommes de terre, betteraves, turneps, varient entre 4 200 et 4 900 calories par kilogramme.

La principale difficulté pour résoudre le problème de la reconstitution artificielle de la lumière solaire, était de toute évidence, la possibilité d'obtenir une source de lumière pouvant, dans les conditions données, assurer aux plantes des radiations aussi semblables que possible en qualité et en quantité à celles qui sont émises par le soleil au cours de la période végétative.

L'énergie radiante projetée par une telle source vers le sol devant se rapprocher, en grammes-calories-minutes centimètres carrés, de celle qu'il reçoit du soleil, et la température de la source d'émission des rayons devant s'approcher, autant que possible de celle du soleil (6000° C).

La composition de la lumière émise par la source d'après les longueurs d'ondes étudiées sur les spectrogrammes, devra également refléter celles qui caractérisent le spectre solaire. Ceci veut dire que non seulement toutes les ondes dont la présence caractérise le spectre solaire au niveau du sol doivent être également émises par cette source, mais aussi que le rapport exprimé en grammes-calories-

minutes de l'énergie apportée par certaines régions du spectre à l'énergie totale de l'émission de la source doivent être, autant que possible, identiques dans les deux cas.

D'après ce qui précède, nous avons vu que, pour réussir il était indispensable d'utiliser une masse importante de radiations comprenant toutes celles qui constituent la lumière solaire, mais, d'un autre côté, si la composition de la lumière émise par la source doit se rapprocher de cette dernière, il était aussi indispensable de tenir compte du fait que certaines radiations sont plus utiles que d'autres, et s'efforcer de les introduire en plus grande quantité dans la lumière émise. C'est le cas des radiations violettes et bleues d'une part, rouges d'autre part, dont nous connaissons l'importance au point de vue de la fonction de photosynthèse.

D'autre part, certaines autres radiations devaient être limitées, réduites à une faible valeur. Les expériences préliminaires nous faisaient envisager les rayons ultra-violetts comme appartenant à cette catégorie de radiations.

Le problème ainsi posé serait, *a priori*, actuellement au moins, au point de vue électrotechnique, insoluble, puisqu'il est impossible de réaliser une source lumineuse artificielle dont la température se rapproche de celle du soleil.

Pratiquement, le problème se heurte surtout à une autre difficulté. Dans les expériences auxquelles nous avons été amenés, la température des filaments de tungstène des lampes employées, si elle n'atteint pas la température de 6 000° C supposée être celle du soleil, approche de 2 600 à 3 000° C; on conçoit qu'une température aussi élevée, puisse provoquer une augmentation importante de la température de la salle expérimentale, et particulièrement la température des plantes soumises directement aux faisceaux lumineux concentrés à l'aide de projecteurs paraboliques.

Or, des expériences précises, faites notamment par MAXIMOFF et IVANOFF, ont montré que c'est dans des conditions de température relativement basses, ne devant en aucun cas dépasser 30° C et si possible se rapprocher de 20 à 25° C, que les expériences sont les plus favorables en ce qui concerne les céréales, végétaux qui nous paraissent les plus exigeants au point de vue de la luminosité; la céréale la plus difficile à cultiver dans ces conditions de lumière artificielle étant le maïs, puis, dans l'ordre: l'orge, l'avoine, le blé.

Ainsi, nous avons deux facteurs qui s'opposent.

C'est ainsi que dans nos expériences actuellement en cours sur le

blé, avec 4 lampes absorbant une puissance constante de 6 kW, malgré tous les dispositifs de ventilation et de réfrigération, la température constante du sol des pots de culture dépasse 25° C et la température de l'air au voisinage des plantes dépasse parfois 35° C, la moyenne normale étant 28° C.

Dans ces conditions, nous sommes déjà sur la frange critique pour réussir notre expérience et, pour réussir complètement, nous sommes à la merci d'une augmentation de la température extérieure.

L'utilisation d'une énergie aussi considérable que celle que nous employons à l'heure actuelle (4 lampes de 1 500 W pour 4,75 m² ; nous a mis, dès le début, dans l'obligation d'utiliser un dispositif nouveau qui réside essentiellement dans la mobilité des lampes, le but étant que les faisceaux calorifiques soient, à chaque instant, déplacés pour qu'ils ne deviennent pas nocifs aux végétaux en culture, ceci étant le but principal (brassage de l'air chaud).

Le courant pris sur le réseau triphasé avec fil neutre de la Société Versaillaise d'Electricité, est fourni au laboratoire sous la tension de 210/120 V à la fréquence de 50 p : s.

Dans notre première expérience, ce courant fut utilisé directement sur les lampes dont le régime était contrôlé par un tableau de distribution équipé de la façon suivante :

Le courant du réseau arrive sur un disjoncteur triphasé à minimum de tension, à trois bobines, fonctionnant par manque de courant sur l'une quelconque des phases. Si le courant venait à manquer pour une raison quelconque, précisément sur la phase où le moteur se trouve branché en l'absence du disjoncteur, celui-ci s'arrêterait tandis que les lampes restant allumées brûleraient les plantes.

A la sortie du disjoncteur, le courant traverse un compteur totalisant l'énergie totale dépensée dans le laboratoire ; il va ensuite aux lampes en traversant un ampèremètre, un interrupteur et un coupe-circuit. Le contrôle de la tension se fait par un voltmètre à lecture directe et par un voltmètre enregistreur.

L'appareil support de lampe est constitué par un flasque de moteur asynchrone hors d'usage qui fut scellé au plafond par quatre tiges et dont l'arbre d'induit fut remplacé par un axe en fer descendant jusque par terre où il est maintenu par une butée sur lequel il tourne. Cet axe supporte les bras porte lampe, le collecteur triphasé et la poulie d'entraînement.

Les lampes sont fixées sur les bras à 2 m. 10 d'axe en axe ; le mouvement rotatif relativement lent (14 t : mn environ) est donné par un

petit moteur électrique à démultiplicateur par vis sans fin marque Era, construit par les Établissements E. RAGONOT.

Pour notre deuxième expérience, qui devait, sous une tension plus

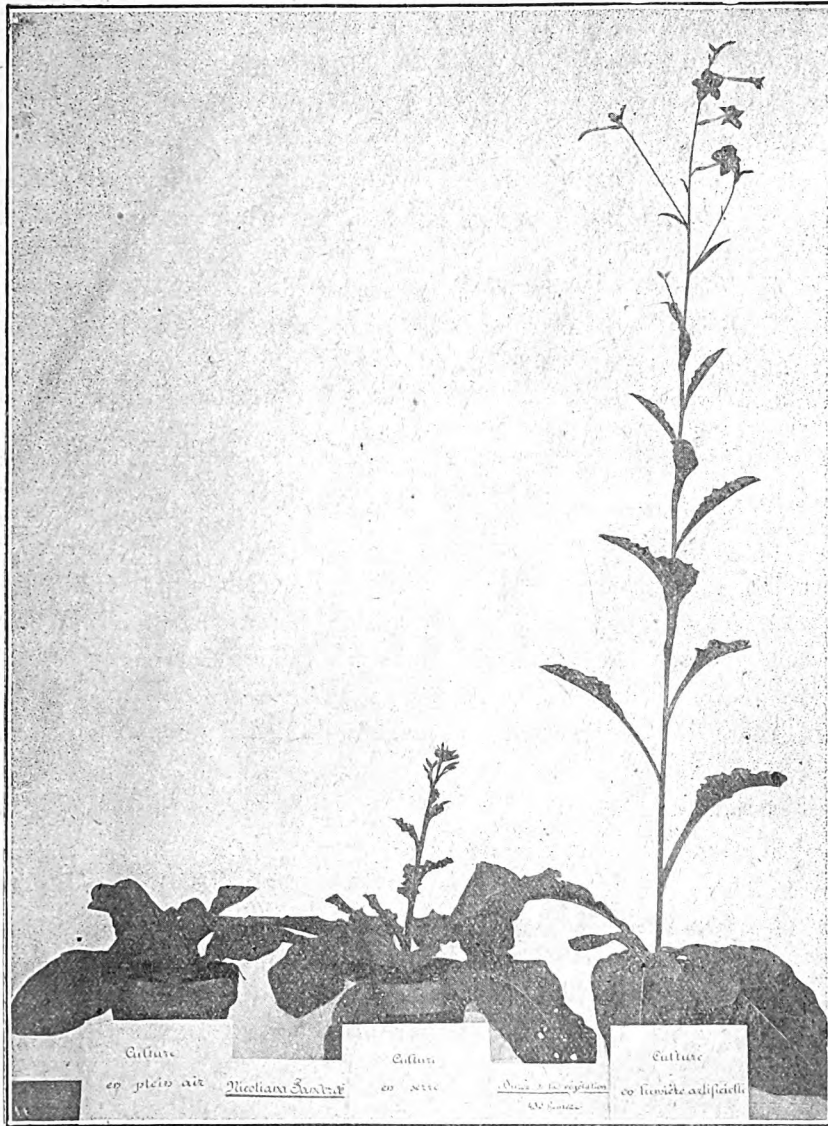


Fig. 1. — 1^{re} expérience sur la culture du tabac ; deux lampes 1000 W, 115 V.

réduite, débiter une intensité plus grande, nous avons dû, tout d'abord transformer le courant du secteur par un autotransformateur muni de prises permettant l'utilisation de 5 en 5 V de toutes les tensions entre 10 et 130 V. Ce transformateur monophasé d'une puissance de 6 kVA

devant alimenter deux lampes était branché entre deux phases, à la sortie du compteur. Notre dispositif tournant fut doté, pour l'intensité plus que doublée qui devait le traverser, d'un autre jeu de bagues et de balais d'une section plus forte.

Nous avons été amenés à modifier encore ce dispositif pour nos expériences en cours. Les lampes en nombre double ayant un régime encore plus poussé, nous avons dû employer un autotransformateur triphasé d'une puissance de 10 kVA. Le dispositif tournant fut muni d'une série supplémentaire de balais, c'est-à-dire de 3 balais par bague, une grande surface de contact étant nécessaire à cause de la faible vitesse de l'appareil.

Notre première expérience fut entreprise avec deux lampes de 1 000 W à 115 V à filament de tungstène en milieu gazeux de fabrication courante de la Société « La Radiotechnique » ; elles étaient munies de réflecteurs paraboliques en aluminium poli, le point lumineux était situé à 1,20 m environ des plantes.

Expériences sur les tabacs. — (*Nicotiana Sanderae*) Ces essais comprenaient trois séries : 1° à la lumière artificielle ; 2° en plein air ; 3° en serre. Les photographies ci-jointes prises respectivement, 190, 260 et 430 après les repiquages, sont particulièrement démonstratives. La floraison a été obtenue, en lumière artificielle, 17 jours après le premier repiquage. Les fleurs offraient une pigmentation très développée, donc une couleur un peu plus accentuée que celle des fleurs normales. Les feuilles avaient les dimensions et l'aspect des feuilles normales, et se distinguaient seulement par une teinte légèrement plus pâle (fig. 1).

Expériences sur les avoines (Avoine noire hybride très hâtive). — Une première expérience, entreprise en même temps que la précédente nous a montré une accélération à la germination, mais le développement des plantes fut insignifiant (étiolement complet, jaunissement) (fig. 2). L'insuffisance de lumière en ce qui concerne les avoines fut donc très nette.

Nous avons été amené ainsi à produire un flux lumineux plus puissant et un rayonnement situé plus à la gauche du spectre.

Les lampes utilisées furent des lampes spécialement construites par la Société « La Radiotechnique » et établies pour une tension normale de 37 V et une puissance de 750 W. Elles furent surchargées pour ces expériences.

La composition de leur verre spécial, fabriqué également par « La

Radiotechnique » verre, et dénommé : « Verre boro-silicate » est la suivante :

Silice	60
Soude.	8
Acide borique	30

Le filament est en tungstène étiré.

Voici quelques caractéristiques photométriques principales, en les considérant, d'une part au régime normal pour lequel elles ont été établies et, d'autre part pour le régime auquel elles furent soumises pour ces expériences et pour celles actuellement en cours.

VOLTS	WATTS	AMPÈRES	LUMENS	RENDEMENT EN LUMENS PAR WATT
37	755	20,4	12 300	16,15
40	850	21,3	17 350	20,4
45	1 012	22,55	27 340	26,95
50	1 193	23,90	39 650	33,2
55	1 386	25,2	54 900	38,6
59	1 536	26,05	76 600	50
60	1 570	26,15	80 100	51

Elles furent utilisées tout d'abord sous une tension de 50 V. L'éclairage au niveau des feuilles, mesuré avec un lux-mètre Holophane, variait avec l'âge des lampes de 45 000 à 37 000 lux.



Fig. 2. — 1^{re} expérience sur les avoines.

Les spectrogrammes montrent que les verres des lampes utilisées laissaient passer des rayons ultra-violetes jusqu'à 3 100 Å, mais en faible

quantité. L'éclairement a été continu pendant toute la durée de l'expérience. Le thermomètre enregistreur, disposé au niveau du feuillage, a montré que la température constante était de 22 à 28° C et, dans le laboratoire, en dehors des zones éclairées, de 18 à 22° C.

Sur la surface annulaire soumise à leur éclairement, de 4,63 m² environ, étaient disposés des pots émaillés de Mitscherlich, qu'on pouvait à volonté abaisser ou lever, afin que la distance entre les foyers et le sommet des plantes restât de 1,20 m environ, distance optima d'après les observations des précédents auteurs, mais d'ailleurs, purement empirique.

Le diamètre des faisceaux lumineux au niveau des plantes était de 53 cm.

Les expériences sur avoine entreprises avec ces nouvelles lampes, ont montré une grande accélération dans le développement des jeunes plants qui n'ont pas tardé, néanmoins, à offrir des signes d'étiollement, absence de rigidité et jaunissement caractéristique de la croissance des plantes en lumière atténuée (fig. 3).

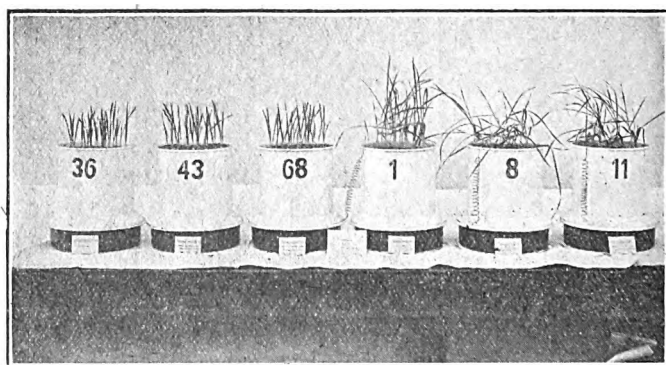


Fig. 3. — 2^e expérience. Avoine. Deux lampes 37 V, 750 W survoltées à 48/50 V. 15 jours de végétation.

- 36. — Lumière naturelle (serre) témoin.
- 43. — Lumière naturelle (serre) engrais complet avec phosphate activé, 2 500 kg à l'Ha.
- 68. — Lumière naturelle (serre) engrais complet avec superphosphate, 2 500 kg à l'Ha.
- 1. — Lumière artificielle, témoin.
- 8. — Lumière artificielle, engrais complet avec phosphate activé, 2 500 kg à l'Ha.
- 11. — Lumière artificielle, engrais complet avec superphosphate, 2 500 kg à l'Ha.

Pour les avoines, il a paru dès lors, que les sources utilisées ne répondaient pas encore à leurs besoins normaux, étant trop faibles. Cependant, ces avoines portèrent leurs graines après 43 jours de lumière électrique continue. Mais cette expérience nous montre que, pour les céréales, la quantité d'énergie lumineuse devait être augmentée.

Des mesures comparatives ont montré que la production chlorophyllienne dans ces avoines était environ de moitié moins intense que dans les feuilles des avoines cultivées à la lumière solaire

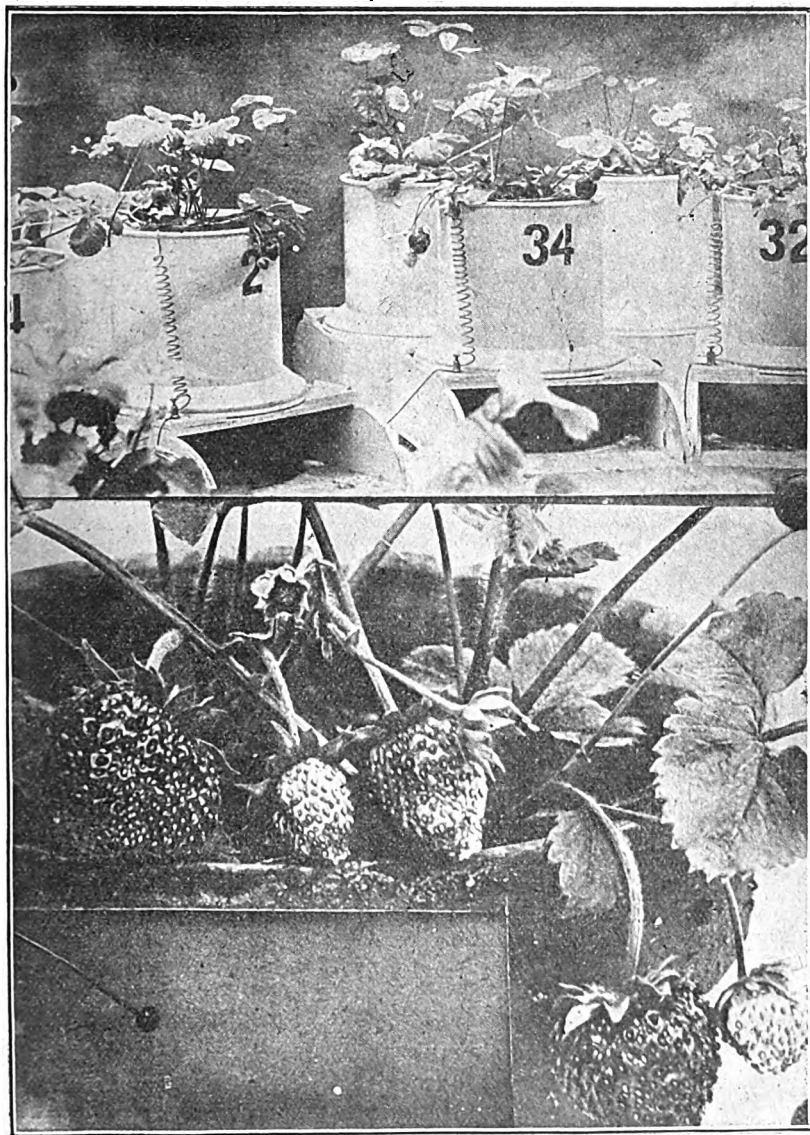


Fig. 4. — Résultats sur fraisiers, 2^e expérience.

Il n'en fut pas de même pour les expériences entreprises sur les fraisiers dont la réussite fut complète, ce qui suffit à démontrer que les exigences en lumière des différents végétaux varient selon les

espèces, ce qui était connu depuis longtemps, et que, dans les conditions de notre expérimentation, il est déjà possible d'industrialiser une production horticole de luxe en lumière artificielle électrique.

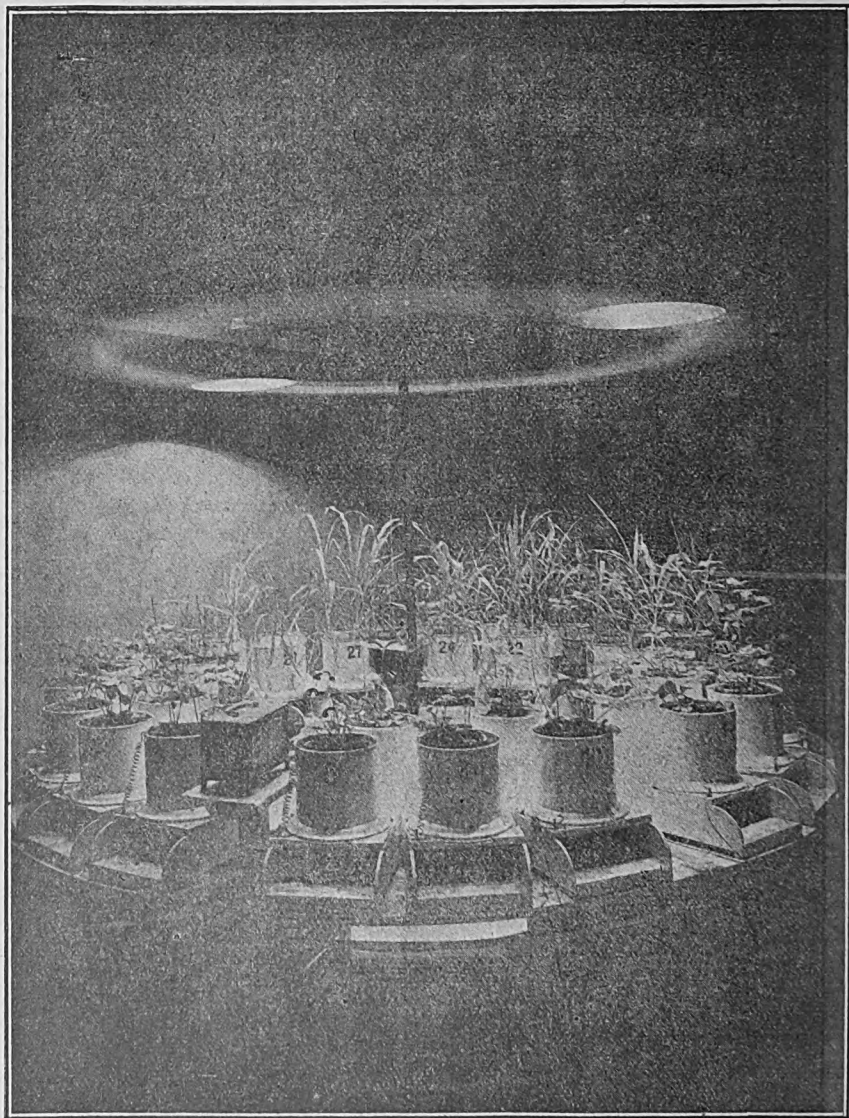


Fig. 5. — Ensemble fraisiers et maïs. — 22 jours après avoir rentré les fraisiers.
2 lampes 57 V, 750 W fonctionnant à 48/50 V.

Le 12 décembre 1928, nous avons rentré au laboratoire des fraisiers préalablement cultivés en pots de 14 cm ; nous avons disposé 50 pots de la fraise variété « Madame Héricart de Thury » par mètre éclairé. A ce moment, ces pots étaient gelés.

De nouvelles feuilles débourrèrent cinq jours après le début de l'éclairement ; la chlorophylle des feuilles semblait normale.

Les premières fleurs à sépales, légèrement colorées de rose, ainsi que cela est typique pour cette variété, se montrèrent le 26 décembre 1928. Elles furent fécondées artificiellement. Les fraises nouèrent normalement à raison de quatre à six par pot. Elles commencèrent à se pigmenter à partir du 17 janvier 1929, prirent une magnifique teinte rouge et atteignirent leur complète maturité le 22 janvier, soit neuf cent soixante heures ou quarante jours après la mise en végétation des plantes (fig. 4 et 5).

Ainsi, malgré la saison hivernale, la vitesse normale de production des fraises a donc été doublée. Le résultat obtenu en lumière artificielle a été d'ailleurs exactement le même que celui que l'on réalise normalement au soleil, en ce qui concerne la couleur, la saveur et les qualités gustatives des fraises.

Après ce succès qui fut consacré par l'Académie des Sciences et la Presse, les recherches se continuèrent, en utilisant le même matériel, sur des rosiers ; le 31 janvier, des rosiers en pots, qui étaient alors complètement gelés, furent rentrés dans le laboratoire et soumis à une taille normale. Le développement des bourgeons se fit d'une façon très régulière. L'expérience, dans son ensemble, se comporta comme celle relative aux fraisiers. Les pousses furent normales, les tiges étant rigides, le feuillage bien développé, et les premiers boutons s'entr'ouvrirent après 37 jours de lumière continue.

Au 45^e jour, 12 rosiers étaient en fleurs. Les roses se formèrent sur les plantes dont l'extrémité se trouvait de 50 cm à 1,10 m du point lumineux.

C'était un nouveau succès à l'actif de notre dispositif.

L'examen microscopique des coupes des pétioles et de la nervure centrale des feuilles de rosiers :

- a) cultivés à la lumière des lampes à filaments de tungstène ;
- b) à la lumière d'une lampe à vapeur de mercure ;
- c) à la lumière de jour (en serre) ;

montra que la structure des feuilles obtenues en lumière tungstène comparée à celle des feuilles obtenues en serre, ne présente que très peu de caractères d'étiollement. Il est même curieux de noter que les coupes des nervures centrales accusent une structure plutôt plus normale dans le cas de la culture sous lampes au tungstène, que dans celui de la culture à la lumière solaire hivernale. Mais on constate, néanmoins, des symptômes d'étiollement dans les coupes des pétioles dans le

1^{er} cas. Ainsi, le parenchyme et les faisceaux liberligneux adhérents à l'épiderme, sont un peu mieux différenciés dans le cas des plantes cultivées à la lumière du jour que dans celles cultivées à la lumière des lampes. On remarque aussi une certaine hypertrophie des cellules de la mésoparenchyme.

Ces caractères d'étiollement se trouvaient de beaucoup plus prononcés dans le cas des rosiers dont le développement se fit sous une lumière riche en ultra-violets, ce qui confirmait la nécessité d'augmenter la puissance de notre matériel.

En conséquence, toujours en collaboration avec la Société « La Radiotechnique », nous étudiâmes un nouveau montage, à 4 lampes cette fois. Les lampes, du même modèle que les précédentes, furent survoltées sensiblement plus.

Tension aux bornes : 56 à 58 V.

Courant de chauffage : 25,5 A environ.

Puissance absorbée par lampe : 1 400 à 1 450 W.

Flux lumineux : 55 000 lumens environ.

Rendement en lumens par watt : 39,4/W environ.

Nous avons mis en route, le 18 avril, une culture de blé de Manitoba et d'avoine noire (fig. 3, 6, 7 et 8).

On peut se rendre compte du résultat acquis en une vingtaine de jours et constater que nous sommes actuellement en très grand progrès, en ce qui concerne les céréales, avec un espoir de réussite complète dans un avenir très rapproché, si toutefois la température extérieure ne vient pas trop contrarier le libre développement des plantes qui est, comme je l'ai déjà signalé, très près de la limite des possibilités.

Entre temps, nous avons été amenés à reprendre la question de l'influence particulière des rayons ultra-violets sur la végétation, problème lié intimement à toute la question qui nous intéresse.

Les anciennes recherches entreprises sur ce point avaient été tout à fait contradictoires. Pourtant, des travaux relativement récents depuis une dizaine d'années, dus surtout à des auteurs américains et notamment à Miss ELTINGE avaient paru dégager une influence plutôt néfaste de ces rayons. Les expériences de Miss ELTINGE avaient été faites avec des lampes en quartz à vapeur de mercure, avec ou sans écran.

Ses conclusions peuvent être résumées ainsi :

Les rayons ultra-violets, quand ils n'exercent pas d'effets regrettables sur la végétation, ne l'influencent jamais favorablement ; mais il

était indispensable de reprendre ces essais, encore peu nets, ce que nous avons fait au début de cette année.

Les expériences entreprises à Versailles, comprenaient l'emploi d'un

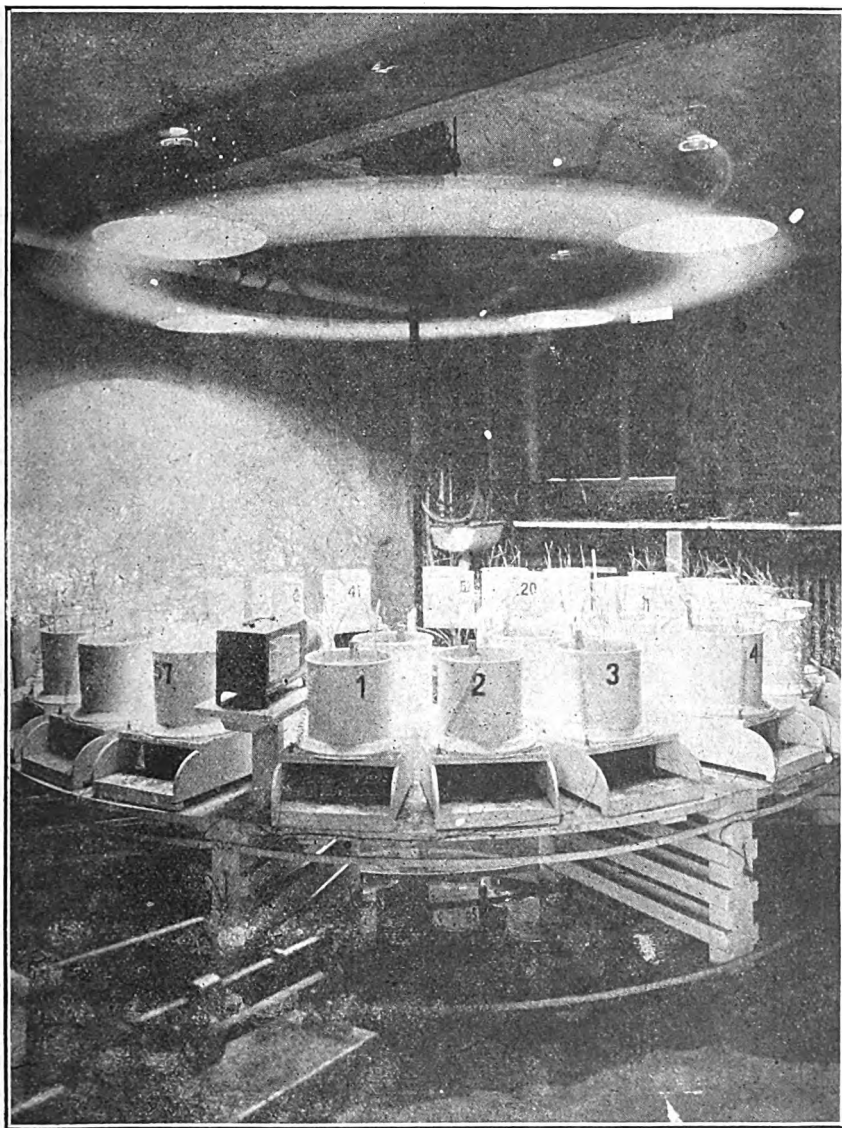


Fig. 6. — Ensemble blé. — 7 jours après ensemencement de la graine.
4 lampes 37 V, 750 W alimentées sous 58/60 V.

tube Cooper Hewitt à vapeur de mercure, en verre au molybdène, qui ne laissait passer qu'une très faible fraction de rayons ultra-violet. Elles ont conduit à des effets tout à fait concordants pour les

4 genres de plantes étudiées : avoine, maïs, rosiers, fraisiers.

Dans tous les cas, ces expériences coïncidaient avec celles faites en lumière électrique continue. Nous avons toujours observé qu'au début de l'expérience, le développement des végétaux soumis à l'action de

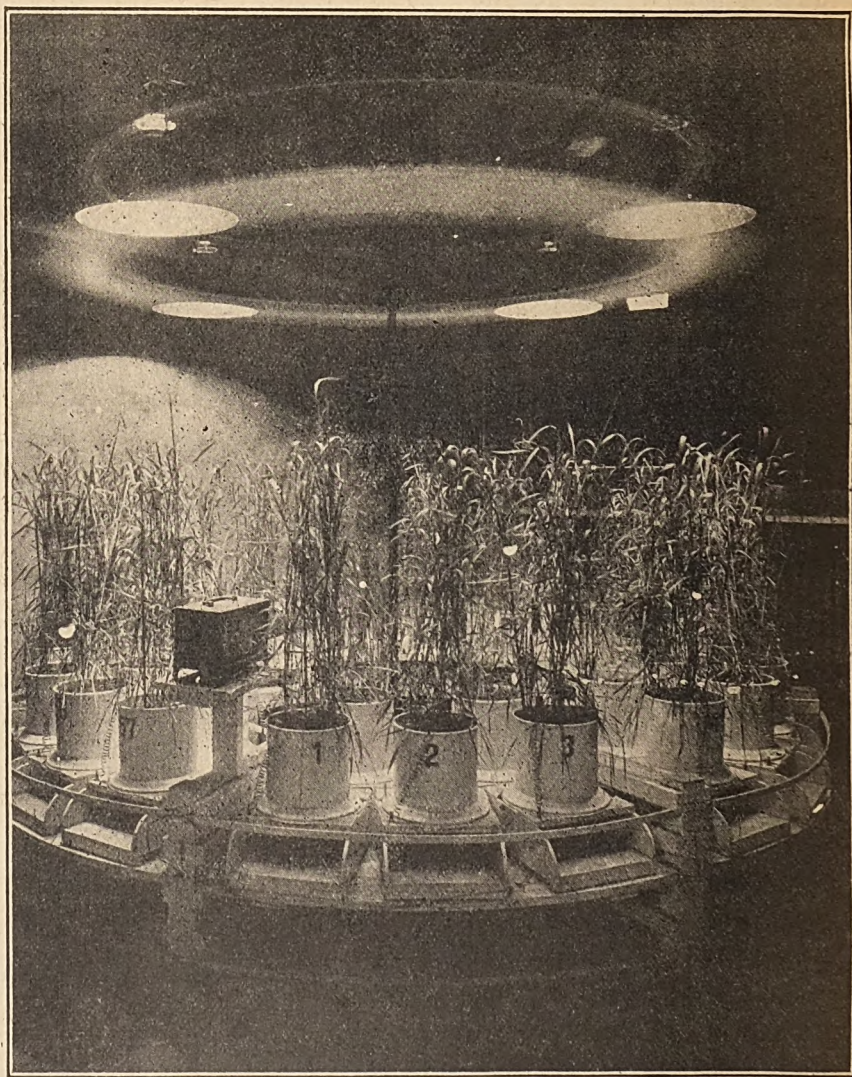


Fig. 7. — Ensemble blé. — 37 jours de végétation.
4 lampes 37 V, 750 W fonctionnant sous 58/60 V.

la lampe à mercure s'était révélé très avantageux et plus accentué qu'avec les lampes à filaments de tungstène, en ce sens que leurs organes verts possédaient déjà, 48 heures après le début de l'expé-

rience, une coloration nettement plus accentuée que dans les conditions normales et poussaient. Cette action heureuse ne s'est pas maintenue au delà de 5 à 6 jours. Une phase de léprose, déterminée par des brûlures plus ou moins graves, accompagnées ultérieurement de stéri-



Fig. 8. — Blé, 4 lampes, 49 jours de végétation.

27. — Serre.

47. — Lumière artificielle.

lité plus ou moins complète de toutes les plantes et conduisant bientôt celles-ci au languissement total, puis à la mort.

De plus, nous avons fait l'intéressante remarque que certains organes sont déformés par ces rayons; c'est ainsi qu'en ce qui concerne les fraisières, les pétales et les sépales des fleurs se sont dupliqués, puis transformés en véritables feuilles très vertes, avec une annulation totale du fruit.

Ainsi, les ultra-violets, s'ils sont peut-être utiles, à très faible dose, difficilement contrôlable, exercent, à dose même peu élevée, une action néfaste conduisant même à la castration.

J'insiste sur la portée générale de ces observations, dont la répercussion au point de vue biologique ne peut pas être niée.

Nos expériences ultérieures vont nous permettre de fixer, quantita-

tivement, la proportion limite des radiations ultra-violettes, indispensables pour assurer une photosynthèse normale. Ce point n'a encore été élucidé par aucun auteur, mais il me paraît capital.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

La solution du problème de la croissance normale des végétaux à l'aide de la lumière artificielle n'est donc pas encore totalement au point.

Véritable symbole de notre époque de progrès, ce problème associe, dans un effort commun, les électrotechniciens, et les biologistes. Il n'est pas actuellement une question de biologie à laquelle ne doivent participer les disciplines des sciences physico-chimiques et des industries qui en découlent. Toute la question de l'influence de la lumière artificielle sur les êtres vivants illustre magnifiquement cette tendance moderne. La collaboration entre tous : physiciens, électrotechniciens, biologistes, médecins, botanistes, agronomes, devient de plus en plus indispensable à la solution de tout problème de portée générale.

En ce qui concerne le domaine des plantes, nous envisageons comme certaine la naissance, dans un avenir plus ou moins rapproché, d'une nouvelle industrie horticole de forage, de production de fleurs et de fruits de luxe, pendant les mois d'hiver, sans le secours de la lumière solaire. Peu à peu, l'utilisation de serres deviendra moins fréquente, celle des anciennes carrières, d'usines spéciales, de buildings en ciment armé se développera. Les lampes produisant à la fois chaleur et lumière, ces deux conditions indispensables à la vie, la production va pouvoir, peu à peu, devenir ainsi une véritable industrie qui se jouera du temps et des saisons. Peut-être, c'est là mon avis, l'avenir résidera-t-il dans l'utilisation équilibrée de serres spéciales, utilisant les rayons solaires pendant le jour, complétés la nuit par une installation de lumière artificielle; on gagnerait ainsi du temps en économisant de l'argent car les kilowatt heures sont chers, mais, indépendamment de ces résultats, purement pratiques, nous voyons, dans les procédés auxquels ils conduisent, la possibilité de mettre à jour une méthode d'expérimentation agronomique qui nous paraît devoir donner les meilleurs résultats.

En effet, l'utilisation de laboratoires spéciaux, tels que ceux déjà installés par nous à Versailles, permettrait de se passer de l'expérimentation agronomique en plein air, en faisant sur place et non

dehors, des séries expérimentales, dont le développement serait relativement très rapide, pouvant atteindre parfois une vitesse triple de la vitesse végétative normale, économisant par conséquent un temps très précieux et dotant en même temps l'agronomie, l'entomologie pratique, la phytopathologie et la génétique, enfin toutes les sciences appliquées à l'agriculture, qui ont besoin d'un grand nombre d'expériences demandant de longues années, d'une méthode expérimentale beaucoup plus rigoureuse.

L'ACCUMULATEUR AU PLOMB ⁽¹⁾

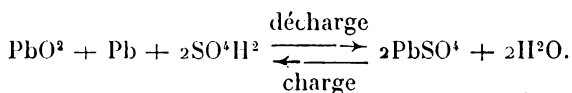
par M. A.-P. ROLLET.

Deux théories en présence : celle de Gladstone (double sulfatation) et celle de Féry. — Expériences de l'auteur : décharge d'une cellule électrolytique argent oxydé, électrolyte alcalin, amalgame alcalin. — Décharge du plomb oxydé dans la pile à amalgame. — Recherches par analyse chimique. — Conclusions : les expériences faites confirment la théorie de Féry.

§ 1. — Deux théories : Gladstone (double sulfatation) et Féry.

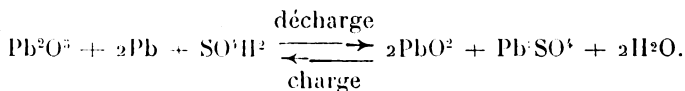
PLANTÉ en 1859 découvrait l'accumulateur au plomb. Il avait reconnu, dans l'accumulateur chargé, la présence de peroxyde de plomb sur l'électrode positive, et de plomb métallique spongieux sur la négative. Durant la décharge de cette pile secondaire, PLANTÉ savait déjà que le peroxyde était réduit au pôle positif, et que sur la plaque négative, le plomb spongieux s'oxydait.

Vers 1882, GLADSTONE et HIBBERT ont présenté la réaction électrochimique suivante pour rendre compte du mécanisme du fonctionnement de l'accu :



C'est la théorie dite de la double sulfatation.

En 1917, M. FÉRY a présenté la réaction :



Ce sont actuellement ces deux théories (théorie de GLADSTONE et théorie de FÉRY) qui retiennent l'attention générale.

§ 2. — Décharge d'une cellule argent oxydé-amalgame alcalin.

Soit une cellule électrolytique constituée par une masse de mercure servant de cathode en présence d'une solution d'hydroxyde alcalin

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'Octobre, le Mercredi 23 Octobre 1929.

(potasse) et par une lame d'argent, utilisée comme anode; en faisant passer un courant continu dans un tel système, le mercure se charge d'amalgame alcalin et l'argent se recouvre d'oxyde. Dans la pile secondaire ainsi réalisée, le potentiel du mercure reste sensiblement constant du fait de la faible variation de concentration en potassium de l'amalgame (en raison de la petitesse des courants mis en œuvre et de la grande masse en mercure de l'électrode). Dans ces conditions le courant de décharge, obtenu en faisant débiter la pile, traduit les variations du potentiel de l'ancienne anode d'argent.

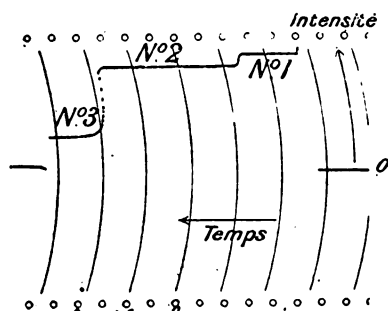


Fig. 1. — Décharge de la cellule argent oxydé. — Amalgame alcalin.

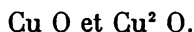
La courbe de l'intensité du courant de décharge en fonction du temps est tracée automatiquement par un ampèremètre enregistreur. (Fig. 1).

En abscisse est porté le temps, en comptant de droite à gauche, en ordonnée l'intensité du courant de décharge. On distingue, trois paliers successifs qui correspondent à trois forces électromotrices différentes. Les surfaces comprises entre les courbes et l'axe des temps représentent des quantités d'électricité. On obtient avec une approximation de l'ordre de $\pm 100\%$, pour les deux premiers paliers, un rapport de quantité d'électricité de 1 à 2. Le premier palier correspond à un peroxyde d'argent qui se réduit intégralement à l'état de Ag^2O . Quand cette réaction est terminée, le potentiel de la lame d'argent tombe brusquement de $+ 0,47 \text{ V}$ à $+ 0,22$, vis-à-vis d'une électrode réversible à oxyde de mercure. Le second palier se dessine alors et, quand Ag^2O est passé complètement à l'état métallique, il y a nouvelle chute du potentiel et apparition d'un troisième palier qui se prolonge tant qu'il y a du potassium dans le mercure du pôle négatif.

Comme le second palier correspond à l'oxyde Ag^2O , ce qui est vérifié par les propriétés chimiques de ce dernier, le premier palier correspond à un peroxyde ayant la moitié de l'oxygène en plus du degré

d'oxydation ordinaire Ag^2O , ce qui fait un rapport de 1 à 2. On obtient alors la formule $\text{Ag}^2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}$, soit Ag^4O^3 . L'analyse chimique m'a permis de vérifier la formule Ag^4O^3 .

Avec le cuivre, les essais m'ont donné deux paliers d'oxyde correspondant à des quantités d'électricité égales et aux deux oxydes bien connus :



§ 3. — Etude de la décharge du plomb oxydé dans la pile à amalgame.

J'ai étudié d'une façon analogue le plomb.

L'électrode est constituée par une lame de plomb placée à l'intérieur d'un vase poreux dans une solution de carbonate de potassium. Le

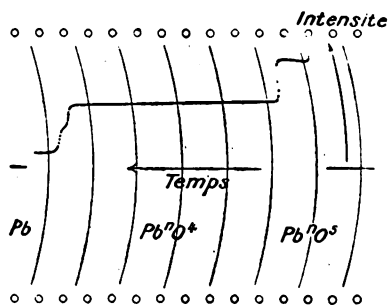


Fig. 2. — Décharge de la cellule plomb oxydé amalgame alcalin.

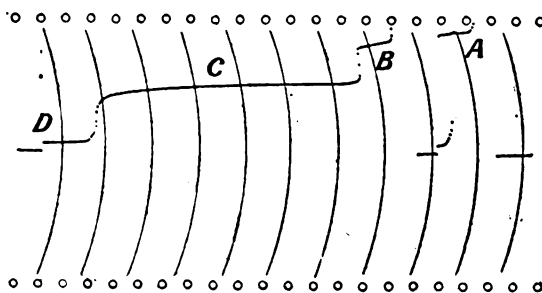


Fig. 3. — Décharge dans l'acide sulfurique (A), puis, après recharge, décharge dans le carbonate de potassium (B, C, D).

plomb est recouvert de métal actif par une série d'oxydations et de réductions successives. Au cours des expériences, l'épaisseur de la matière active des lames de plomb, déterminée par comparaison de capacité avec des plaques ordinaires d'accumulateur, était voisine de 10^{-3} ou 10^{-2} mm, cette matière active étant répartie de façon homo-

gène. La densité de courant durant la décharge était située entre les limites de 0,01 et de 0,3 A par dm^2 de surface apparente.

Une lame de plomb, oxydée électrochimiquement dans l'acide sulfurique ou dans le carbonate de potasse, donne, par décharge dans la pile à amalgame, une courbe montrant trois paliers (fig. 2). Le troisième correspond au Pb métallique. Les quantités d'électricité sont à peu de chose près dans le rapport de 1 à 4 pour les deux premiers paliers. Une autre expérience consiste à décharger une petite lame de plomb, d'abord dans l'élément d'accumulateur où elle a été oxydée puis, après une recharge ménagée, à la décharger dans la pile à amalgame (fig. 3); on a les quantités d'électricité 1,1 et 4. On peut aussi,

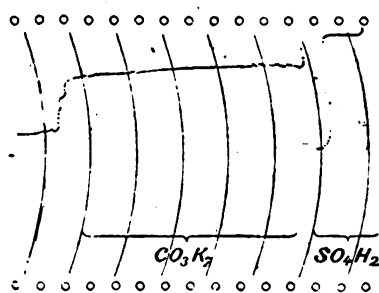


Fig. 4. — Décharge dans l'acide sulfurique, puis dans le carbonate de potassium.

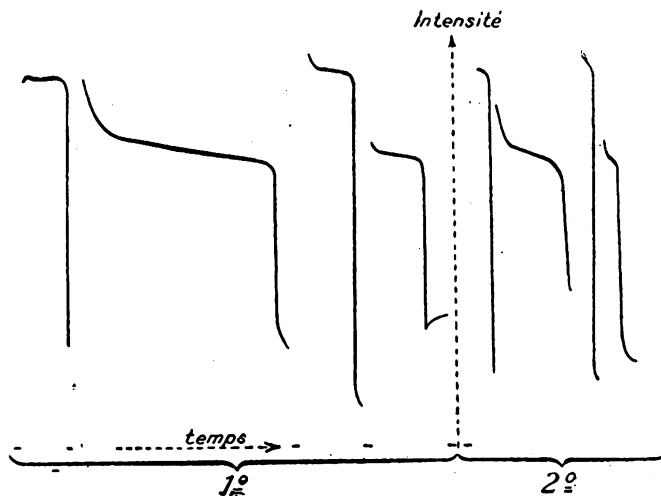


Fig. 5. — Enregistrement photographique.

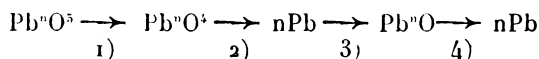
après décharge de la lame dans l'acide sulfurique, la transporter dans la cellule à amalgame, on a les quantités d'électricité 1 et 4 (fig. 4).

La figure 5 représente un enregistrement photographique. On dis-

tingue huit courbes successives. Les quatre premières correspondent, pour une même lame de plomb, aux opérations suivantes : 1° décharge comme pôle positif dans l'acide sulfurique (après charge dans le même élément); 2° achèvement de la réduction dans la cellule au carbonate; 3° décharge comme pôle négatif dans l'acide sulfurique de la lame telle qu'elle vient d'être réduite; 4° réduction dans la cellule au carbonate.

Les quatre courbes qui suivent reproduisent la même expérience faite avec une autre lame de capacité moindre.

Les quantités d'électricité données par les quatre courbes sont à peu de chose près entre elles comme : 1,4, 1 et 1. Comme la quantité de plomb actif d'une lame reste la même au cours de l'expérience, on peut représenter cette série de transformations par le schéma :



Lors de la transformation 3), la même masse de plomb ne fixe que le quart de l'oxygène correspondant à la transformation 2). Si, pour cette dernière on admet : $\text{PbO}^2 \rightarrow \text{Pb}$, on doit donc admettre pour 3) : $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{\text{IV}}\text{O}$. L'oxyde connu PbO^2 correspondrait donc au produit intermédiaire $\text{Pb}^{\text{IV}}\text{O}^4$, et $\text{Pb}^{\text{IV}}\text{O}^5$ au produit $\text{Pb}^{\text{IV}}\text{O}^5$. Remarquons à ce sujet, que c'est la seule possibilité qui explique les courbes de la figure sans faire intervenir pour la transformation 3) un corps inconnu (le sous-oxyde $\text{Pb}^{\text{IV}}\text{O}$ est, en effet signalé depuis longtemps).

§ 4. — Recherches par analyse chimique.

La méthode employée ne peut donner que le degré d'oxydation du métal. Les combinaisons formées avec les acides (acide sulfurique ou acide carbonique) ne sont pas mises en évidence. Je me suis donc adressé à l'analyse chimique.

L'analyse chimique du degré d'oxydation atteint par l'électrode positive m'a donné des résultats discordants causés par la présence du plomb métallique du support. Cependant, les résultats conservent une signification qualitative nettement établie : les composés que j'ai caractérisés par les formules $\text{Pb}^{\text{IV}}\text{O}^4$ et $\text{Pb}^{\text{IV}}\text{O}^5$, correspondent tous deux à des degrés d'oxydation supérieurs à PbO .

Des déterminations de la quantité de SO^4 fixé m'ont donné les résultats suivants : la plaque positive fraîchement chargée de l'accumulateur, ne contient que très peu d'acide sulfurique fixé. Après la dé-

charge dans l'acide sulfurique, la teneur a fortement augmenté et sensiblement dans la proportion voulue par la loi de Faraday pour la formation de SO^4Pb .

Quant à la plaque négative, l'analyse a montré qu'il s'agit de sulfate de plomb pour le degré d'oxydation désigné par : Pb^2O . Ce résultat implique la formule SO^4Pb^2 déjà proposée par DENHAM et FÉRY. Je cite encore à ce sujet quelques expériences. Une lame de platine est recouverte, par dépôt anodique, d'un très mince enduit de peroxyde de plomb qui est réduit à l'état métallique dans la cellule au carbonate. On connaît dans ces conditions, par pesée, le poids du plomb métallique mis en œuvre. Cette lame est mise comme négative dans un élément ordinaire d'accumulateur. Le courant débité donne la quantité du radical SO^4 qui se fixe. L'analyse chimique permet de contrôler la fixation de l'acide sulfurique. J'ai trouvé des formules comprises entre :



soit SO^4Pb^2 avec une légère perte de plomb.

§ 5. — Conclusions.

Examinons séparément le cas des deux électrodes de l'accumulateur.

Electrode positive. — Bien que Pb^2O^5 n'ait pas pu être séparé et analysé, son existence paraît admissible. Les courbes de décharge semblent bien le mettre en évidence. Cette méthode a donné de bons résultats avec $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Ni}$; par analogie, on peut admettre que la méthode reste bonne avec le plomb.

Dans l'accumulateur, la réduction de Pb^2O^5 va jusqu'à PbO^2 . L'analyse chimique indique l'absence du radical SO^4 sur l'électrode chargée. On a donc affaire à un oxyde.

Sur l'électrode déchargée, il y a, au contraire, fixation sensiblement de 1 SO^4 lors du passage de 2 F coulombs. Il ne semble donc pas que le produit formé par la décharge soit PbO^2 .

La théorie de Féry ($\text{Pb}^2\text{O}^5 \rightarrow 2\text{PbO}^2$) n'indique pas la fixation de l'acide sulfurique sur l'électrode positive. Cette fixation est expliquée par la théorie de Gladstone, mais cette dernière ignore le peroxyde Pb^2O^5 . D'autre part, admettre la théorie de Gladstone, c'est admettre ce fait un peu étrange : quelles que soient les conditions expérimen-

tales, une proportion de matière active positive voisine de 40 pour cent, est seule susceptible d'être utilisée.

En raison de l'extrême faiblesse d'épaisseur de la couche de matière active et de la petitesse des courants de décharge, il paraît difficile d'admettre que ce soit un défaut de conductibilité qui arrête la décharge aussi brusquement pour le coefficient d'utilisation de 40 pour cent, alors que dans le carbonate de potassium, la matière active reprend instantanément une très bonne conductibilité. Pour les mêmes raisons, il ne semble pas que ce soit un défaut de diffusion de l'acide sulfurique.

Electrode négative. — Pour cette électrode, le degré d'oxydation atteint après décharge, est Pb^2O . Il s'est fixé 1SO^4 pour 2 F coulombs, on obtient la formule Pb^2SO^4 ; c'est celle proposée par M. Féry. En admettant la théorie de la double sulfatation, on constate que c'est la proportion remarquable de 50 pour cent de la matière active qui est mise en œuvre; c'est la proportion maximum utilisable dans l'acide sulfurique. La fin de décharge se produit trop brusquement et trop près du rendement de 50 pour cent pour ne pas admettre l'effet d'une réaction particulière : formation d'un sous-sulfate de plomb SO^4Pb^2 .

La théorie de Féry relative au fonctionnement de la plaque négative de l'accumulateur au plomb ($\text{Pb} \rightarrow \text{SO}^4\text{Pb}^2$) s'accorde donc bien avec mes observations.

REMARQUES DE M. FÉRY, AU SUJET DE LA COMMUNICATION DE M. A.-P. ROLLET.

Remarques sur les résultats obtenus par M. Rollet. — Fixation du sulfate de plomb sur la positive après la décharge

Les résultats expérimentaux obtenus par M. A.-P. Rollet dans la belle thèse de doctorat qu'il vient de soutenir à Strasbourg, confirment pleinement ma théorie.

Grâce au dispositif ingénieux de sa « cellule à électrolyte alcalin », M. Rollet obtient après la charge de cette cellule, une véritable pile secondaire dont la négative est formée d'amalgame de potassium, tandis que la positive est constituée par la lame du métal étudié, recouverte d'une couche de l'oxyde le plus riche que peut donner l'électrolyse.

Le potassium est plus réducteur, grâce à la grande chaleur de formation de son oxyde, que tous les métaux employés comme électrode positive dans les accumulateurs actuels ; il réduit donc facilement, jusqu'à l'état métallique, la positive chargée de la cellule.

L'étude raisonnée des divers paliers obtenus, et aussi l'analyse chimique des composés formés sur l'électrode de la cellule constituée avec le métal étudié, ont amené M. Rollet aux conclusions suivantes :

1° La décharge d'une positive en plomb, dans la cellule même où elle a été formée, donne trois paliers : le premier correspondant à Pb^2O^3 , le second à PbO^2 et le troisième à Pb métallique (1).

2° La même positive ne donne que le palier (2) dans l'acide sulfurique avec une négative en plomb spongieux (accumulateur ordinaire), cette négative étant insuffisante pour réduire plus profondément la positive.

3° L'analyse chimique a montré à M. Rollet que la décharge de la

(1) A ce moment, la cellule devient absolument analogue à ma pile dépolarisée par l'air, où le zinc est disposé horizontalement au fond de l'élément, tandis que la positive en charbon, placée dans les régions superficielles aérées, est dépolarisée par l'oxygène de l'air.

C'est à cette dépolarisation qu'est dû le troisième palier observé par M. Rollet.

(2) Ce palier est dû à la seule réduction de Pb^2O^3 , dont j'ai fait l'analyse autrefois en détachant la matière active d'une grille positive chargée.

négative transforme le plomb spongieux en sulfate plombéux SO^+Pb^2 . Ainsi se trouve confirmée l'existence pendant le fonctionnement de l'accumulateur ordinaire, des deux composés que j'avais signalés en 1919 (1).

4° La réduction de cette négative déchargée normalement et remise dans la cellule alcaline (passage de SO^+Pb^2 à Pb), fournit une quantité d'électricité égale à celle obtenue avec la même plaque fonctionnant comme positive (passage de Pb^2O^2 à PbO^2) dans l'accumulateur ordinaire.

Cette quantité d'électricité devient *exactement double*, si, après décharge dans l'acide sulfurique, on laisse la plaque s'oxyder à l'air (passage de Pb^2SO^+ à 2PbSO^+).

Cette oxydation constitue l'accident de la « sulfatation », car la négative ainsi sulfatée ne peut que très difficilement être ramenée à l'état métallique en milieu acide.

6° L'application de la formule de la double sulfatation aux résultats numériques donnés par la décharge, conduit M. Rollet à ce résultat inexplicable que 40 pour cent seulement de la matière active sont utilisés à la positive, et 50 pour cent à la négative, malgré les excellentes conditions d'une formation Planté.

Mes expériences de 1919, faites sur des grilles à oxyde rapporté, conluisaient à 35 pour cent pour la positive, et 49 pour cent pour la négative, en les interprétant également par la double sulfatation.

Fixation de sulfate de plomb sur la positive après la décharge.

On a reproché à ma théorie de ne pas expliquer la production de SO^+Pb à la positive.

M. Rollet a fait les remarques suivantes :

« La plaque positive de l'accumulateur fraîchement chargée ne contient, dit-il, que peu de SO^+ fixé.

« Après décharge, cette teneur a fortement augmenté, et sensiblement dans la proportion voulue par la loi de Faraday. En réalité, ajoute-t-il, les résultats sont très variables et il semble qu'il se fixe moins de SO^+ que ne l'indique la quantité d'électricité obtenue. Si la positive reste quelque temps à l'état déchargé, cette teneur en SO^+ augmente.

(1) Recherches sur le fonctionnement chimique de l'accumulateur au plomb. (*Société française des Electriciens*, 3^e série, T. VIII, n° 77-1919).

Voici à mon avis quel est le mécanisme de la fixation du sulfate de plomb sur la positive :

On a toujours admis que l'électrolyte de l'accumulateur contenait en solution du sulfate de plomb.

Ce sel relativement soluble dans l'acide concentré, 0,21 pour cent pour un acide de densité 1,724, d'après Anthon, est à peine plus soluble dans l'eau distillée que le sulfate de Baryum; d'après Rodwel, l'eau pure n'en dissout que 0,00315 pour cent.

La positive, immédiatement après la charge, contient dans ses pores un acide très concentré, dû à l'apport des ions SO_4^+ ; le sulfate de plomb est dissous dans cet acide et la plaque examinée en vive lumière (soleil, ou lampe ponctuelle à grand éclat telle qu'un arc ou une lampe 1/2 watt) est d'un beau noir velouté *sans aspect cristallin*.

Abandonnée au repos dans l'élément, cette plaque se recouvre bientôt d'une *multitude de petits cristaux transparents et très réfringents de PbSO_4* , ces cristaux donnent à la plaque une apparence cristalline qui a même été attribuée autrefois au peroxyde de plomb lui-même.

Un examen microscopique montre qu'il n'en est rien, et que la matière active reste à l'état amorphe.

La formation de ces cristaux superficiels est due à la dilution de l'acide occlus dans la plaque, par le liquide extérieur moins riche en SO_4H^2 , qui diffuse lentement dans cette plaque.

Pendant la décharge ultérieure, ces cristaux augmentent encore de grosseur par l'apport des ions Pb et surtout H, ces derniers diluant le liquide occlus par suite de la formation de l'eau qui résulte de la réduction du peroxyde.

On voit donc que cette augmentation du SO_4Pb fixé, croîtra grossièrement avec le débit de l'accumulateur, mais que *ce sel reste étranger à la production du courant*, et que sa formation ne peut trouver place dans la réaction de décharge. Le « Mystère » de la positive, comme l'appelle M. Rollet, se trouve ainsi expliqué.

Conclusions.

Tous ces faits confirment complètement les résultats de mes anciennes recherches; j'ose espérer qu'ils rallieront à ma théorie ceux qui l'ont critiquée.

Il ne lui manque plus que le contrôle de la formule de Thomson; ceci ne pourra être fait que lorsque les données thermo-chimiques rela-

tives à la formation de Pb^2O^5 et SO^4Pb^2 , auront été déterminées au calorimètre.

En donnant le mécanisme véritable du fonctionnement de l'accumulateur, ma théorie, comme je l'espérais en entreprenant mes recherches en 1915, m'a permis déjà d'apporter plusieurs perfectionnements dans la construction des éléments industriels (1).

D'autres améliorations découleront encore, je l'espère, de la connaissance exacte des réactions de charge et de décharge de l'accumulateur au plomb.

(1) Un accumulateur transportable et insulfatable, par E. Reynaud Bonin : Ingénieur en chef des P.T.T (Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones, 13^e année, n° 12, décembre 1924). Et divers brevets sur un séparateur protecteur pour accumulateurs au plomb.

POSTES EXTÉRIEURS ⁽¹⁾

par M. BARILLOT

Historique. — Comparaison entre les installations extérieures et intérieures, frais de 1^{er} établissement, dépenses d'exploitation, sécurité d'exploitation. — Conclusions : opportunité de la réalisation d'installations extérieures.

1. — HISTORIQUE DE LA QUESTION.

Les premiers projets de postes extérieurs de quelque importance ont été conçus aux Etats-Unis vers 1908. En 1914, la puissance totale des transformateurs installés dans les postes extérieurs en service dans ce pays, était de 300 000 kVA. Ces installations se développaient donc déjà à cette époque, mais leur opportunité donnait lieu à de nombreuses discussions. En fait, la question se posait alors de la façon suivante : l'équipement extérieur entraînait une diminution des frais d'établissement de l'ordre de 10 à 15 pour cent ; par contre, d'une part, la sécurité d'exploitation était diminuée du fait du fonctionnement moins sûr des appareils exposés aux intempéries et d'une visite plus difficile, d'autre part les frais d'entretien étaient plus élevés.

Le montage à l'extérieur posait, en effet, de nouveaux problèmes dans la construction du matériel électrique. Il y avait lieu, en particulier, de réaliser des cuves parfaitement étanches pour les interrupteurs et les transformateurs, d'étudier des dispositions spéciales pour combattre les condensations dans ces cuves et pour conserver une fluidité suffisante aux huiles d'interrupteurs pendant les grands froids.

Ces problèmes n'étaient alors que partiellement résolus, et, en tout cas, les dispositions adoptées n'étaient pas encore sanctionnées par l'expérience.

De plus, l'appareillage électrique pour la très haute tension et notamment les interrupteurs à huile étaient encore d'un fonctionnement incertain et nécessitaient de fréquents décuvages, opérations dont la difficulté dans les postes extérieurs est évidente.

Cela explique qu'alors l'opinion courante aux Etats-Unis était que le

(1) Ce rapport sera discuté à la semaine d'octobre, le jeudi 24 octobre 1929.

montage extérieur paraissait tout à fait indiqué pour des postes peu importants contenant peu d'appareillage et pour lesquels une sécurité absolue de fonctionnement n'était pas exigée.

Par contre, le montage intérieur était recommandé pour les grands postes devant desservir des centres importants.

Les premiers postes extérieurs montés en France datent de 1920.

La technique du montage à l'extérieur était alors parfaitement au point aux Etats-Unis, car les progrès effectués dans la construction du matériel électrique avait permis d'obtenir une sécurité d'exploitation des postes extérieurs, comparable à celle des installations intérieures.

Cependant, on ne se lança dans cette voie qu'avec une grande prudence. On adopta d'abord une disposition transitoire en prévoyant les transformateurs et les interrupteurs abrités dans des cabines séparées et en installant seulement en plein air les barres, les sectionneurs et les parafoudres.

Puis on réalisa des installations complètement extérieures, mais avec des charpentes disposées et calculées de façon à recevoir le cas échéant une toiture qui abriterait l'ensemble des appareils. C'est ainsi qu'en particulier a été exécuté le poste de transformation de Saint-Etienne (transport de force à 120 kV entre l'usine hydro-électrique de Beaumont-Monteux et Saint-Etienne).

Les résultats d'exploitation des premiers postes construits étant encourageants et confirmés d'ailleurs par ceux des postes en service aux Etats-Unis, le nombre de postes extérieurs en service en France s'est multiplié depuis 1923.

En particulier, le montage à l'extérieur a été adopté presque généralement dans les installations à haute tension correspondant à l'électrification de la ligne Paris-Vierzon de la Compagnie d'Orléans.

Le poste de transformation de Chevilly (2 bancs de transformateurs de 25 000 kVA) qui assure la liaison des lignes 90 kV desservant les sous-stations avec le réseau de distribution 60 kV de l'U. D. E. est entièrement monté à l'extérieur ; il n'existe dans ce poste que 3 bâtiments de dimensions restreintes : l'un abritant le tableau de commande, l'autre la fosse de décuvage et le troisième les pompes assurant la circulation de l'eau de refroidissement des transformateurs.

Le poste de Chaingy, situé près d'Orléans (2 bancs de transformateurs de 20 000 kVA), qui assure la liaison entre les lignes 90 kV et la ligne 150 kV, venant de l'usine hydro-électrique d'Eguzon, ainsi que la

régulation de la tension du réseau, possède tout l'appareillage 90 kV et 150 kV monté à l'extérieur. Le bâtiment du poste abrite seulement les tableaux de commande, les compensateurs synchrones, leur appareillage et les barres correspondantes (6 600 V) ainsi que la fosse de décufrage.

Toutes les sous-stations alimentées par les lignes 90 kV (9 sous-stations, puissance installée totale 44 100 kVA) ont leur poste de transformation monté à l'extérieur, le bâtiment n'abrite que le tableau de commande, les commutatrices, l'appareillage et les connexions à 1500 V.

Certaines de ces sous stations contiennent également un poste de transformation branché sur les lignes 90 kV et alimentant à moyenne tension des distributions d'énergie locales. Les parties moyenne tension correspondant à ces postes sont également montées à l'extérieur (poste 33 kV de la sous-station de Saran, poste 15 kV de la sous-station des Saugées.)

A ces installations doivent s'ajouter celles en cours de réalisation qui correspondent à l'aménagement du transport de force à 220 kV entre le Massif Central et Paris (poste 60/220 kV de Chevilly, poste 150/220 kV de Chaingy, poste 90/220 kV d'Eguzon, poste de Marèges). Ces nouvelles installations sont entièrement prévues à l'extérieur, les services auxiliaires et les tableaux étant seuls abrités dans des bâtiments.

II. — COMPARAISON ENTRE LES INSTALLATIONS EXTÉRIEURES ET LES INSTALLATIONS INTÉRIEURES.

La comparaison entre les installations extérieures et les installations intérieures peut être faite aux points de vue suivants :

- 1° Frais de premier établissement,
- 2° Dépenses d'exploitation,
- 3° Sécurité d'exploitation.

1°. — *Frais de premier établissement.* — Le montage à l'extérieur permet la suppression du bâtiment abritant les transformateurs ainsi que les barres et l'appareillage à haute tension. L'économie résultant de cette suppression est d'autant plus sensible que la tension est plus élevée, car les écartements à prévoir entre conducteurs et entre conducteurs et masse, et par conséquent, les dimensions des cellules augmentent presque proportionnellement avec la tension de service. Pour

les hautes tensions, l'importance des bâtiments que l'on est obligé de conserver de toute façon (bâtiment du tableau, bâtiment des services auxiliaires : pompes de refroidissement, décuvage), est alors très faible vis-à-vis de celle du bâtiment dont on évite la construction.

Par contre, la surface de terrain nécessaire à l'installation d'un poste extérieur est en général plus grande que celle correspondant au même poste monté à l'intérieur. Cependant le prix du terrain ne représente la plupart du temps qu'une très faible partie du prix total de l'installation et ne peut entrer en comparaison que dans les cas très particuliers où il a une grande valeur (par exemple à l'intérieur d'une grande ville).

Le matériel électrique prévu spécialement pour le montage à l'extérieur coûte plus cher, toutes choses égales d'ailleurs, que le matériel du type intérieur.

La différence n'est pas très sensible pour les transformateurs, car elle ne porte en général que sur les bornes de sortie qui n'entrent que pour peu de chose dans le prix global de l'appareil.

Elle est plus importante pour les interrupteurs dans l'huile ; cependant elle ne dépasse pas 10 pour cent pour les tensions égales ou supérieures à 25 kV, mais pour les tensions inférieures, elle peut atteindre 50 pour cent du prix de l'appareil type intérieur ⁽¹⁾.

Il y a lieu de noter toutefois que, pour les appareils à grosse puissance de coupure, les constructeurs ont tendance à ne présenter au-dessus de 25 kV qu'un seul type d'appareil pouvant indifféremment être monté à l'intérieur et à l'extérieur.

En ce qui concerne les sectionneurs et les supports de barres, la différence de prix entre les appareils type extérieur et les appareils type intérieur est considérable. La majeure partie de cet appareillage est en effet constitué par les isolateurs. Même pour 60 kV, les sectionneurs ou les supports pour l'extérieur valent 3 ou 4 fois plus que l'appareillage correspondant au type intérieur.

Les considérations précédentes mettent en évidence que les installations extérieures sont avantageuses au point de vue des frais de première installation dans les cas suivants :

a) Postes de transformation dans lesquels le prix des transformateurs

(1) Ce gros écart de prix provient surtout de ce que l'appareillage extérieur pour des tensions inférieures à 15.000 V n'existe pas d'une façon courante et que l'on est conduit à utiliser des appareils construits pour une tension de service supérieure.

constitue la majeure partie des frais d'installation. C'est le cas de nombreux postes ruraux dans lesquels la protection du transformateur est assurée simplement par des fusibles. Le prix de l'appareillage à haute tension constitué, la plupart du temps, par un sectionneur et des fusibles, est très peu élevé et même si ce prix est multiplié par 3 ou 4, par suite de l'installation à l'extérieur, cette majoration est, en général, largement compensée par l'économie résultant de la suppression du bâtiment.

b) Postes de transformation à moyenne tension (25 à 70 kV), dans lesquels le schéma des connexions est simple (nombre réduit de jeux de barre et de départs) et la puissance installée importante. Le prix des transformateurs et des interrupteurs à huile, constitue la majeure partie des frais correspondant à l'acquisition du matériel; dans ces conditions, l'augmentation de prix correspondant à la fourniture de sectionneurs et de supports de barre du type extérieur est négligeable en regard de l'économie résultant de la suppression du bâtiment.

c) Postes à très haute tension (au dessus de 70 kV). Etant donné les dimensions qu'il est nécessaire de donner au bâtiment devant abriter les barres et l'appareillage lorsque la tension de service dépasse 70 kV il est toujours plus économique, quelle que soit la puissance ou le schéma de l'installation, de prévoir le montage à l'extérieur.

2°. — *Dépenses d'exploitation.* — L'entretien du matériel monté à l'extérieur paraît présenter certaines sujétions de nature à entraîner des frais d'exploitation plus importants que dans une installation intérieure.

En particulier, les travaux nécessitant le démontage ou simplement l'ouverture de la cuve d'un interrupteur ou d'un transformateur ne peuvent être effectués sur place. L'appareil à revoir doit être amené à couvert, ce qui nécessite des manutentions souvent pénibles.

Dès que les unités atteignent une certaine puissance, les postes doivent être desservis par un réseau de voies permettant le transport du matériel sur chariot spécial. Cependant, l'agencement convenable des voies de service ainsi que l'adoption d'un type de chariot permettant d'éviter l'installation de plaques tournantes (chariots à deux directions utilisés dans les postes de la Compagnie d'Orléans), amélioreraient très sensiblement les conditions dans lesquelles sont effectuées les manutentions nécessaires, et l'expérience acquise dès maintenant montre, qu'en général, les frais supplémentaires correspondant à ces manutentions sont peu importants.

Il y a lieu d'ailleurs de remarquer que, dans les postes intérieurs, la

visite sur place des interrupteurs et des transformateurs de grande puissance présente également des difficultés. Ces appareils sont en effet installés dans des niches où le démontage est impossible. Il faut comme dans les installations extérieures, amener les appareils à réviser dans la fosse de décufrage. Un réseau de voies est également nécessaire et les manutentions à effectuer sont comparables. On peut seulement faire valoir en faveur des postes intérieurs qu'étant donné leur disposition plus ramassée, le trajet que l'appareil a à parcourir est plus réduit.

Les appareils construits actuellement pour l'extérieur sont complètement étanches, les rentrées d'eau ne sont pas à craindre si le montage a été bien exécuté. Les condensations à l'intérieur des cuves ne sont pas à redouter pour les transformateurs lorsque ceux-ci sont munis de conservateurs d'huile. Cependant, il y a lieu de suivre de plus près l'état de l'huile lorsque les appareils ne sont pas abrités.

Les joints des traversées sont particulièrement à surveiller et doivent être remplacés dès qu'ils paraissent tant soit peu défectueux.

Il est indispensable d'effectuer des prélèvements périodiques (tous les 3 mois environ) au bas des cuves pour vérifier à l'éclateur la rigidité diélectrique de l'huile. Si la rigidité a été reconnue inférieure à des limites fixées à l'avance, il doit être procédé au filtrage de l'huile de l'appareil.

L'entretien des sectionneurs, pratiquement inexistant dans les postes intérieurs, doit être effectué soigneusement ; en particulier, les commandes mécaniques, qui souvent comportent des renvois plus ou moins compliqués, doivent être revues périodiquement, surtout si elles sont rarement manœuvrées.

L'accès des sectionneurs est souvent difficile et nécessite une certaine agilité de la part des agents, il peut être facilité par l'établissement de passerelles ou de planchers intermédiaires (postes 90 kV de la Compagnie d'Orléans).

L'entretien des charpentes métalliques ne présente pas de difficultés spéciales, à condition toutefois que la peinture ait été bien exécutée ; les dépenses correspondantes n'excèdent pas, dans ces conditions, les dépenses d'entretien du bâtiment qui seraient à prévoir dans le cas de l'installation intérieure.

Au contraire, si les premières couches n'ont pas été appliquées d'une façon satisfaisante, cet entretien peut constituer une sujétion très onéreuse.

Il y a lieu de noter, à ce sujet, la tendance actuelle à remplacer, dans certains cas, les charpentes métalliques par des ensembles en béton armé pour lesquels les frais d'entretien sont réduits au minimum.

Depuis quelque temps aussi, on tend à réduire dans de grandes proportions, l'importance des charpentes en faisant supporter les barres omnibus par des colonnes d'isolateurs rigides montées sur des massifs au niveau du sol.

En résumé, les dépenses d'exploitation d'un poste extérieur ne sont pas beaucoup plus élevées que celles d'un poste intérieur, à condition toutefois, que l'installation soit judicieusement conçue et comporte des appareils dont la construction ait été soigneusement étudiée pour le montage à l'extérieur.

3° *Sécurité d'exploitation.* — L'expérience que l'on a actuellement des postes extérieurs montre que la proportion d'incidents dus à des avaries d'appareils n'est pas plus importante dans ces installations que dans celles où le montage est prévu à l'intérieur, à condition toutefois que les appareils utilisés soient parfaitement adaptés aux conditions d'emploi et soient entretenus avec soin.

Les répercussions de l'avarie d'un appareil sur le reste de l'installation sont en général moins graves dans un poste extérieur, où les distances entre appareils sont beaucoup plus grandes, que lorsque le montage est effectué dans un bâtiment. En particulier, les explosions d'interrupteurs ou de transformateurs sont beaucoup moins à redouter en plein air que dans un espace clos. Les incendies peuvent être plus facilement combattus qu'à l'intérieur d'un bâtiment où la fumée rend rapidement l'atmosphère irrespirable et la lutte contre le feu particulièrement pénible.

Les fausses manœuvres qui correspondent presque toujours à l'ouverture d'un sectionneur en charge ne causent, la plupart du temps, dans les postes extérieurs, que des dégâts très limités, car l'arc amorcé se souffle beaucoup plus facilement à l'air libre. Très souvent, les dégâts se bornent à quelques piqûres sur le couteau de l'appareil manœuvré intempestivement.

L'adoption du montage à l'extérieur des installations haute tension correspond, d'autre part, à un accroissement considérable de la sécurité pour le personnel d'exploitation. En effet, dans les postes intérieurs où il est toujours difficile de prévoir de nombreux dégagements, les avaries au matériel provoquant des incendies ou des explosions, peuvent être dangereuses pour le personnel situé à proximité, car

celui-ci ne peut souvent être dégagé qu'au prix de grandes difficultés.

Etant donné, d'autre part, la faible distance qui sépare dans ces postes les opérateurs des sectionneurs, toute manœuvre intempestive de ces appareils cause presque toujours des accidents plus ou moins graves pour le personnel.

Par contre, dans les installations extérieures, les facilités de dégagement en cas d'accident, la distance séparant du personnel les appareils et les conducteurs sous tension, permettent d'assurer aux agents la sécurité maximum.

A ce sujet, il convient de noter que, depuis la mise en service des installations de la Compagnie d'Orléans, aucun accident grave n'est survenu au personnel exploitant dans les postes extérieurs. Les quelques accidents enregistrés jusqu'ici se sont toujours produits à l'intérieur des bâtiments.

Les perturbations causées par les intempéries dans l'exploitation des postes extérieurs constituent la principale objection présentée à la réalisation de ces installations.

Dans nos climats, on ne peut songer au montage à l'extérieur au-dessus de l'altitude à partir de laquelle il y a lieu de redouter les chutes de neige suffisamment abondantes pour former rapidement une couche recouvrant complètement les appareils et en interdisant l'accès.

L'altitude limite est d'ailleurs fonction de la tension de service, car les appareils peuvent fonctionner convenablement sous des couches de neige d'autant plus épaisses que les dimensions de leurs bornes de sortie sont plus grandes.

Une couche de neige de 50 cm d'épaisseur peut arrêter complètement l'exploitation d'un poste de 25 kV et n'amener aucune perturbation dans un poste de 150 kV.

Il ne paraît pas prudent, en France, de dépasser 1000 m d'altitude pour les postes extérieurs dont la tension de service est inférieure à 60 kV.

Mais, en dehors de ces cas spéciaux, on a constaté que, moyennant certaines précautions, l'exploitation des postes extérieurs pouvait s'effectuer en toute sécurité, quelles que soient les conditions climatiques.

En utilisant pour les interrupteurs de l'huile spéciale, dont le point de congélation est très bas et, s'il est besoin, en réchauffant les cuves par l'intermédiaire de résistances, on peut assurer, par de très grands froids, un fonctionnement normal de ces appareils placés à l'extérieur.

D'autre part, les tuyauteries d'eau de refroidissement des transformateurs doivent être assez profondément enterrées et les parties de ces canalisations situées à l'extérieur munies de revêtements calorifuges. Les transformateurs non en service doivent rester sous tension pour que la chaleur provenant des pertes à vide empêche la température de l'huile de s'abaisser au point de congélation, et la circulation de l'eau ne doit pas être arrêtée.

En ce qui concerne les installations de la Compagnie d'Orléans, l'exploitation du poste de Coindre (90 kV), situé à une altitude de 600 m dans une région où le climat est particulièrement rude, ne donne lieu à aucune difficulté pendant la mauvaise saison, bien que la température s'abaisse fréquemment au-dessous de -20°C et qu'il y ait de fréquentes chutes de neige. Pendant l'hiver extrêmement rigoureux de 1928-1929, l'exploitation du poste a donné toute satisfaction, bien que des températures inférieures à -30°C aient été constatées.

III. — CONCLUSIONS.

OPPORTUNITÉ DE LA RÉALISATION D'INSTALLATIONS EXTÉRIEURES.

L'étude comparative qui vient d'être faite, met en évidence qu'à l'exception du cas où le poste doit être monté dans une région dont les conditions climatiques sont spéciales (chutes abondantes de neige) (1), l'installation du matériel en plein air présente actuellement des garanties de sécurité au moins égales et même supérieures à celles correspondant à l'installation dans un bâtiment.

D'autre part, les conditions locales d'établissement (dimensions du terrain disponible, nature des arrivées, etc...) imposent souvent, en dehors de toute autre considération, le choix du type de poste à adopter.

En particulier, les postes situés dans des agglomérations où le terrain disponible est restreint et où les canalisations sont constituées par des feeders souterrains, seront le plus souvent installés à l'intérieur du bâtiment.

Dans tous les autres cas, ce sont les considérations d'ordre économique qui déterminent le choix du type d'installation, étant bien entendu que l'on doit faire entrer en ligne de compte, non seulement les frais de premier établissement, mais encore les frais d'exploitation.

(1) Dans ce dernier cas, l'on adopte pour les postes à très haute tension les dispositions prévues pour le montage à l'extérieur, mais on abrite l'ensemble de l'installation sous un hangar.

En résumé, on peut admettre qu'en règle générale, le montage à l'extérieur est préférable pour toutes les installations dont la tension de service dépasse 60 kV.

Pour les tensions comprises entre 20 kV et 60 kV, le choix du type de montage dépend en grande partie de la constitution du poste. Un poste de schéma simple et contenant de grosses unités, sera plus avantageux à monter à l'extérieur.

Pour les tensions inférieures à 20 kV, il est actuellement plus avantageux de prévoir le montage de l'installation dans un bâtiment. Il y a lieu toutefois d'excepter le cas où l'installation se réduit à un transformateur avec appareillage peu important (sectionneurs, fusibles), il peut alors être intéressant d'installer le poste en plein air (postes ruraux sur poteaux).

EMPLOIS DES CONDENSATEURS DANS LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION (1)

par M. Paul BUNET.

Généralités sur les emplois des condensateurs dans les réseaux. — I. Condensateurs en dérivation. — Emplacement des condensateurs. — Comparaisons avec les compensateurs synchrones. — Applications. — Influence des condensateurs sur les chutes de tension. — Résonances à la fréquence fondamentale et aux fréquences harmoniques. — Formule générale. — Formule pratique. — Exemple. — Mise en circuit des condensateurs : surtension, surintensités. — Emploi d'un condensateur avec petite inductance en série.

II. Condensateurs en série. — Emploi des condensateurs en série pour la réduction des chutes de tension dans les conducteurs. — Tension aux bornes du condensateur. — Application; appareillage. — Tensions et courants harmoniques. — Addition de condensateurs en dérivation.

1. — Généralités sur les emplois des condensateurs dans les réseaux.

Les condensateurs ont fait, au cours des dernières années, des progrès importants, notamment en ce qui touche la sécurité de leur fonctionnement. Aussi d'anciennes applications se sont-elles développées et de nouvelles ont-elles apparues. Nous nous occuperons ici simplement des emplois des condensateurs dans les réseaux de distribution, que ces appareils soient installés par les abonnés ou par l'exploitant lui-même.

Les condensateurs peuvent se brancher en dérivation sur les conducteurs d'alimentation à tension constante ou presque. Un condensateur, sous la tension U , à la fréquence f ou pulsation ω , de capacité C , absorbe un courant I déphasé d'un quart de période en avant sur U tel que

$$I = 2\pi f CU = \omega CU,$$

et si l'on caractérise le déphasage de 90° en avant par $j = \sqrt{-1}$,

$$I = j2\pi f CU = j\omega CU.$$

On désigne ordinairement les condensateurs par leur puissance réac-

(1) Cette communication sera discutée à la Semaine d'octobre, le jeudi 24 octobre 1929.

tive à la fréquence normale envisagée,

$$UI = 2\pi fCU^2 = \omega CU^2,$$

exprimée en volt ampères; certains se servent du mot watt que les autres réservent à la puissance active. On dit aussi watt réactif (Boucherot).

En sus de la puissance réactive ci-dessus, un condensateur absorbe une puissance active qui se dissipe en chaleur. Cette perte est, dans les modèles ordinaires à feuilles de papier imprégné, très faible par rapport à la puissance réactive, au-dessous de 1 pour cent, tombant quelquefois à 0,2 pour cent. Cette valeur est la tangente de l'angle dont diffère de 90° le déphasage du courant absorbé.

Les condensateurs en dérivation peuvent l'être sur la haute ou sur la basse tension. Généralement, les éléments, prévus pour une tension normale favorable étant donné le mode de construction adopté, se disposent par groupes en série (cascade) et en quantité (surface). La puissance réactive ne change pas au total, quels que soient les groupements si chaque élément reste soumis à la même tension entre ses armatures. Le prix reste donc le même pour une puissance réactive donnée, à part des questions d'isolement de l'ensemble, d'appareillage.

On associe les condensateurs en dérivation à d'autres appareils : transformateurs, moteurs, arcs, dont le courant se déphase en arrière de la tension, absorbant ainsi de la puissance réactive. On obtient alors une certaine compensation, en vue de ramener à 1, ou d'en rapprocher le facteur de puissance du feeder ou de l'installation totale.

Les condensateurs peuvent aussi être montés en série dans les fils d'alimentation qui se trouvent métalliquement interrompus entre leurs armatures. Ainsi embrochés dans ces fils parcourus par un courant I , les condensateurs déterminent entre leurs armatures une tension en quadrature (aux pertes près), ou en arrière de 90° sur le courant I , soit

$$U = \frac{1}{\omega C} \quad \text{ou} \quad U = -j \frac{1}{\omega C}.$$

On modifie ainsi la chute de tension dans un conducteur; en particulier, on peut compenser son inductance qui n'intervient plus alors dans la chute de tension.

Un condensateur C peut résonner avec une inductance L , lorsque la condition $\omega^2 LC = 1$ est remplie.

Les harmoniques, de fréquence h fois plus élevée que l'onde fondamentale, résonneront lorsque $h^2 \omega^2 LC = 1$, ω désignant toujours la

pulsation de l'onde fondamentale, déterminée par le mode de construction des générateurs et leur vitesse angulaire.

Lorsque la résonance se produit, on trouve que la tension aux bornes du condensateur comme aux bornes de l'inductance, ainsi que le courant absorbé, peuvent devenir infinis si le circuit ne comporte pas de résistance, ni en général de cause de dissipation d'énergie. Quand on tient compte de ces dissipations, les surtensions et surintensités ne se chiffrent plus que par des valeurs finies, mais qui peuvent devenir assez grandes quelquefois. Il y a donc lieu de rechercher dans quelles limites on doit employer les condensateurs afin de rester à l'abri de ces accidents dommageables.

CONDENSATEURS EN DÉRIVATION

2. — Emplacement des condensateurs.

La tension U à l'arrivée, fermée sur un appareil d'utilisation réactif, donne lieu au courant $I_A - jI_R$ dont la valeur efficace est $\sqrt{I_A^2 + I_R^2}$ (figure 1).

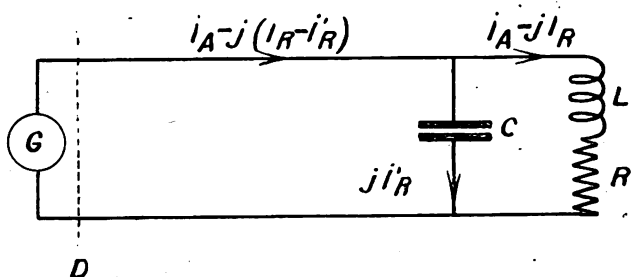


Fig. 1. — Compensation, par un condensateur en dérivation, de la réactance d'un appareil.

En ajoutant un condensateur, celui-ci absorbe un courant $+jI'_R$. Le courant dans la ligne est réduit à $I_A - j(I_R - I'_R)$ ou en valeur efficace $\sqrt{I_A^2 + (I_R - I'_R)^2}$.

On peut ainsi faire fonctionner le générateur avec un facteur de puissance plus voisin de l'unité. Avec la compensation parfaite $I_R = I'_R$. Le courant en ligne se réduit au courant actif I_A .

Si l'on avait placé le condensateur au départ en D, le courant n'aurait pas été réduit dans la ligne, mais seulement dans le générateur G.

De même, dans le cas d'un transformateur T , ses enroulements seront parcourus par un courant plus faible si le condensateur est en A sur le secondaire, au lieu d'être en B sur le primaire (fig. 2).

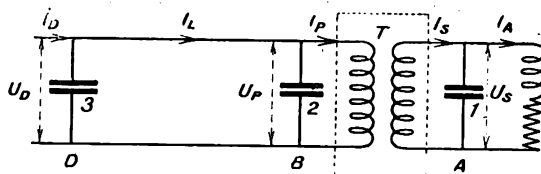


Fig. 2. — Compensations progressives, par plusieurs condensateurs en dérivation, de la réactance d'une installation de transformateur.

En général, il vaudrait mieux, pour l'utilisation la meilleure des différents appareils de l'installation, compenser localement. Si l'on a compensé en A le déphasage amené par le circuit à basse tension, il faudrait placer un second condensateur en B pour soulager la ligne de la puissance réactive demandée par le transformateur; puis il faudrait un troisième condensateur en D pour soulager les générateurs de la

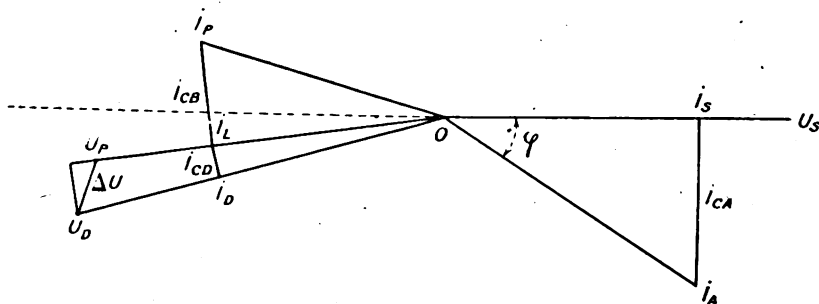


Fig. 3. — Diagramme des courants et tensions en cas de compensations progressives selon la fig. 2.

OU_S	tension secondaire.	i_{CB}	courant dans le condensateur 2.
Ol_A	courant absorbé par les abonnés.	Ol_L	courant en ligne ramené en phase avec U_P .
i_{CA}	courant dans le condensateur 1.	ΔU	chute de tension en ligne.
Ol_S	courant secondaire ramené en phase avec OU_S .	OU_D	tension au départ.
OU_P	tension primaire.	i_{CD}	courant dans le condensateur 3.
Ol_P	courant primaire.	Ol_D	courant au départ ramené en phase avec OU_D .

puissance réactive demandée par la ligne. La figure 3 se rapporte à des compensations locales et exactes successives. Cette multiplication des condensateurs sera ordinairement jugée excessive. En plaçant un

seul condensateur en B amenant la suppression du déphasage au départ, on aurait la figure 4.

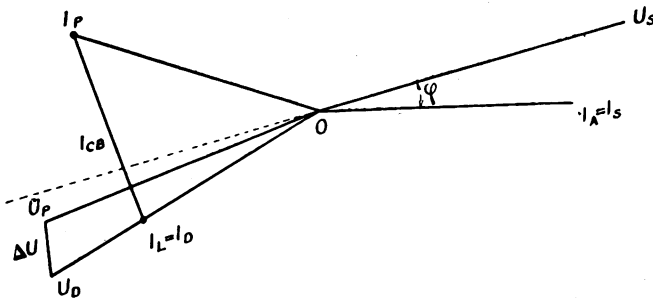


Fig. 4. — Compensation par un seul condensateur en B (fig. 2).

Selon les cas, on adoptera telle ou telle simplification de la figure 2, avec des déphasages locaux tolérés.

3. — Comparaisons avec les compensateurs synchrones.

Les compensateurs synchrones ou moteurs synchrones surexcités ramènent aussi le facteur de puissance plus près de l'unité. Ce sont, comme les condensateurs, des générateurs de puissance réactive; on les place en dérivation, comme les condensateurs dans le cas qui nous occupe.

Les compensateurs synchrones sont beaucoup plus avantageux lorsque l'on désire procéder à un réglage précis et continu de la puissance réactive, puisque l'on n'a qu'à agir sur l'excitation ou celle de l'excitatrice. Pour obtenir le même résultat avec des condensateurs, il faudrait recourir à des mises sous tension ou suppressions, à des couplages, opérations peu faciles souvent quand on doit opérer sur un circuit de tension élevée. On pourrait, toutefois, conserver toujours en service les condensateurs correspondant au maximum de la puissance réactive à fournir et leur adjoindre des inductances variables et réglables. Mais, surtout dès qu'il s'agit d'une puissance élevée, dépassant quelques milliers de kVA, le condensateur n'est pas encore prêt à lutter avec le moteur synchrone.

Le prix des condensateurs est indépendant de leur puissance, car ils sont toujours constitués par une réunion de petits éléments, souvent de 5 à 20 kVA chacun. Ce prix atteint, à la fréquence 50 p : s, environ 500 fr : kVA à la tension de 200 V par élément. En adoptant

une tension plus forte, on abaisse le prix (peut-être en réduisant quelque peu la sécurité malgré une augmentation de l'isolement entre armatures parallèlement à celle de la tension); le prix unitaire passe par un minimum, vers 500 V ou un peu plus pour l'isolement au papier imprégné. Ce minimum a lui-même pour minimum environ 300 fr : kVA ou un peu au-dessus. Des questions de sécurité, de hardiesse, de pureté des courbes de tension doivent également être considérées.

Il est facile de diviser les batteries de condensateurs puisqu'elles sont composées d'éléments de faible puissance. Comme, de plus, les condensateurs sont immobiles et ne demandent que fort peu de surveillance, on peut les répartir et les placer aux meilleurs endroits. Il est difficile, au contraire, d'installer beaucoup de petits compensateurs synchrones

Les moteurs synchrones coûtent sensiblement moins cher, surtout pour les unités un peu fortes, où l'on arrive à 100 fr : kVA, et encore moins pour les unités très fortes. Ce prix augmente pour les petites unités, comme vers 200 fr : kVA avec 50 kVA. Il faut tenir compte, cependant, de ce que les compensateurs rotatifs exigent des fondations et des bâtiments, tandis que les condensateurs demandent beaucoup moins de frais d'installation; on en a placé à l'extérieur, dans des cuves à huile comme les transformateurs.

Les pertes des compensateurs rotatifs, surtout celles des petits appareils, atteignent et dépassent 5 pour cent. Il y a donc à mettre en balance les frais d'établissement et le coût d'exploitation et l'on arrive, selon les cas et les idées, à trouver plus ou moins d'avantage à l'une ou l'autre solution.

Ainsi, supposons la fourniture de PkVA réactifs; les condensateurs coûteront, admettons-le, 200 P francs de plus que les compensateurs. Si la marche annuelle peut se représenter schématiquement par 4 000 heures de pleine charge avec 0,05 PkW d'économie en faveur des condensateurs, ces derniers sauveront annuellement 200 PkWh. Il y aurait donc lieu, dans cet exemple particulier, de déterminer si une dépense d'installation supplémentaire de 1 franc est ou n'est pas préférable à une économie annuelle de 1 kWh.

Les condensateurs ont un rôle, efficace quelquefois, comme absorbeurs d'ondes de fréquence élevée ou de variations rapides. Ce peut être un avantage sur les compensateurs rotatifs; mais, par contre et pour une même raison, ils absorbent des courants harmoniques d'autant plus élevés relativement, que leur fréquence est plus grande.

Si la tension appliquée n'est pas une pure sinusoïde, le courant pris par le condensateur est très déformé; cela augmente généralement son échauffement et cela introduit des courants harmoniques dans le réseau. En général, dans les grands réseaux, cela n'a pas beaucoup d'importance car les courbes de tension sont généralement satisfaisantes; il faut cependant y penser car il y a des exceptions.

Les condensateurs offrent certains dangers de résonances, avec surtensions dont nous parlons ci-après.

4. — *Applications de condensateurs en dérivation.*

Ces applications commencent à devenir assez nombreuses chez les abonnés désirant remonter le bas facteur de puissance amené souvent par des moteurs asynchrones fonctionnant à faible charge. Ces installations sont généralement de puissance faible ou modérée, car pour les gros moteurs, comme ceux de 100 kW et au-dessus, les condensateurs joints à des moteurs asynchrones, ne peuvent guère lutter avec les moteurs synchrones ou synchronisés, et pour des puissances même inférieures, les moteurs à collecteur apportent une solution.

Les exploitants eux-mêmes commencent à installer des condensateurs. Citons, à titre d'exemple, une des installations les plus puissantes, réalisée aux Etats-Unis, celle d'Aberdeen (Washington) (1). Le service doit être, en principe, effectué par un alternateur de 5 000 kW, prévu pour un facteur de puissance 0,8, tandis que le facteur de puissance du réseau n'atteint que 0,6. On décida d'installer des condensateurs, et, pour soulager les lignes, on les répartit aux extrémités de six feeders, avec une puissance réactive totale de 2 000 kVA, soit directement sur la haute tension qui est de 4 000 V, en deux points, soit sur la basse tension des transformateurs, qui est de 440 V, en quatre points. Deux mesures, faites avant et après l'installation des condensateurs, indiquent que, pour une même charge de 3 900 kW, le facteur de puissance au générateur a passé de 0,644 à 0,821, le courant dans l'alternateur baissant de 845 à 667 A, et le courant d'excitation de 335 à 289 A. Le coût de l'installation des condensateurs a été de 34 000 dollars, tandis qu'un compensateur synchrone, placé à l'usine génératrice, n'aurait coûté que 10 000 dollars, sans toutefois le bâtiment nécessaire. En regard de ce supplément de coût, on

(1) *General electric review*, juillet 1928; *Industrie électrique*, 10 janvier 1929.

a estimé que les pertes du compensateur excéderaient celles des condensateurs de 640 000 kWh : an, à quoi il faut ajouter ce qu'on gagne dans les lignes et les transformateurs en faisant la compensation à l'arrivée, soit 500 000 kWh : an, au total 1 140 000 kWh : an estimés à 0,005 dollar : kWh (0,125 fr : kWh), soit un gain annuel de 5 700 dollars. Il faut mettre cette somme annuelle en balance avec la dépense d'installation supplémentaire de 24 000 dollars.

On doit cependant tenir compte de ce que l'on possède beaucoup plus de renseignements quant à la durée des moteurs synchrones qu'en ce qui touche les grosses batteries de condensateurs ; toute comparaison comporte donc une certaine indécision.

5. — *Influence des condensateurs sur les chutes de tension.*

Si l'on dispose les condensateurs au départ, près des générateurs, on gagne sur l'excitation de ces derniers. Mais, en ce qui concerne la ligne, on n'a évidemment aucune variation entre les tensions relatives aux deux extrémités pour une charge donnée, avec ou sans condensateurs au départ.

En disposant les condensateurs à l'arrivée, on fait varier le courant et le déphasage sur la ligne. Si r est la résistance linéique, l l'inductance linéique de la ligne, en prenant par exemple, le kilomètre pour unité, la chute de tension efficace, en volts par kilomètre, est approximativement donnée par :

$$rI \cos \varphi + l\omega I \sin \varphi,$$

φ étant le déphasage produit à l'arrivée par la charge appliquée.

(L'ordre de grandeur de $l\omega$ est de 0,1 ohm : km pour les câbles, 0,4 ohm : km pour les fils aériens ; avec 100 mm², $r = 0,2$ ohm : km).

Appelons P , P_a , P_r les puissances apparente, active, réactive de la charge appliquée, I , I_a , I_r les courants correspondants, la chute de tension est :

$$rI_a + l\omega I_r = \frac{1}{U} (rP_a + l\omega P_r).$$

Plaçons un condensateur à l'extrémité d'arrivée ; il fournit une puissance réactive P'_r avec un courant absorbé I'_r . La chute de tension devient :

$$[rI_a + l\omega I_r] - l\omega I'_r = \frac{1}{U} [(rP_a + l\omega P_r) - l\omega P'_r].$$

La chute de tension diminue, mais la régulation ne change pas,

c'est-à-dire qu'une tension fixe étant maintenue au départ, l'addition du condensateur rapprochera la tension à l'arrivée de cette tension au départ pour une charge donnée. Mais si cette charge varie, les variations de la tension à l'arrivée ne seront pas modifiées, car l'addition de :

$$l\omega I_r' = \frac{1}{U} l\omega P_r'$$

ne change que le zéro à partir duquel on compte ces variations.

6. — Résonances à la fréquence fondamentale et aux fréquences harmoniques.

Quand une capacité et une inductance sont en présence, la fréquence d'oscillation libre du système est, si la résistance est faible, $\frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Si celle-ci coïncide avec la fréquence appliquée, il y a résonance. Alors $\omega^2 LC = 1$. L'inductance et la capacité s'équilibrent, le courant dans les deux appareils en série, n'est plus limité que par la résistance. Si cette résistance s'annule, les tensions sur le condensateur et l'inductance, le courant qui les traverse, lorsqu'une tension de la fréquence de résonance est appliquée, deviennent infinis. Ce simple raisonnement peut, à première vue, inspirer beaucoup de craintes.

On rencontre cependant, sur les réseaux, des inductances de toutes grandeurs entre des limites très étendues. Prenons un exemple : sur un réseau à 10000 V et $f = 50$ p : s, un transformateur de potentiel absorbe environ 100 VA réactifs, soit une réactance de 10^6 ohms et une inductance de 3×10^3 H. Elle entre en résonance avec $\frac{1}{300} \mu F$, cette capacité ayant également une puissance réactive de 0,1 kVA.

On trouve sur le réseau, dans les transformateurs allant des transformateurs de potentiel aux appareils les plus puissants, toutes les valeurs d'inductances depuis la précédente presque jusqu'à zéro. D'autre part $\frac{1}{300} \mu F$ est la capacité de 15 m de câble souterrain. Tous les branchements comportant 15 m de câble et au delà peuvent entrer en résonance pour la fréquence 50 p : s elle-même avec l'inductance d'un transformateur de la taille d'un appareil de mesure et au delà. La présence de fer (ferro-résonance) peut rendre les résonances encore plus probables.

Malgré cela, l'expérience journalière nous apprend que ces réseaux

fonctionnent convenablement. Cela tient à deux causes principales : 1° la disposition des appareils est telle que les tensions aux bornes du condensateur et de l'inductance ne peuvent s'élever librement; 2° l'influence de la résistance du circuit et, en général, de la puissance active en jeu, a aussi un rôle important.

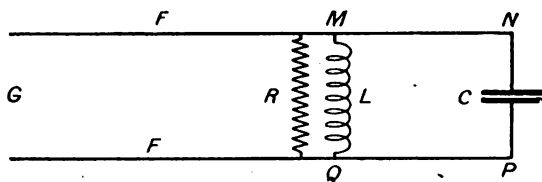


Fig. 5. — Montage d'un condensateur sur un feeder de résistance et d'inductance négligeables : résonance en MNPQ sans surtension.

D'une station génératrice G (fig. 5), un feeder F dessert un centre d'arrivée où se trouvent une charge représentée par une résistance R et une inductance L toutes deux en dérivation. On ajoute une capacité C et la condition $\omega^2 LC = 1$ se trouve réalisée forcément si l'on veut ramener à l'unité le facteur de puissance. Dans le circuit MNPQ il y a résonance. Mais la station génératrice, tout le réseau, sont en dérivation. Si la station génératrice maintient une tension fixe, si la résistance et l'inductance du feeder sont négligeables, on ne pourra avoir aucune surtension. En fait, le feeder n'a jamais une résistance et une inductance nulles; il convient donc de traiter le problème de cet ensemble, et non pas seulement celui de L et C tout seuls.

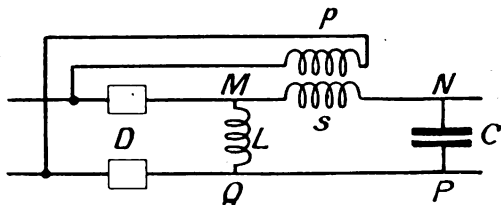


Fig. 6. — Même montage avec interrupteur D et survolteur ps pouvant donner des surtensions.

Il n'en est pas toujours ainsi. Le circuit MNPQ est séparé du réseau par le fonctionnement d'un disjoncteur D; mais il doit être alors privé de force électromotrice et il demeure sans courant. Il n'en serait pas de même si l'on avait intercalé, par exemple, dans ce circuit, le secondaire s d'un survolteur dont le primaire n'est pas coupé par l'ouverture de D (fig. 6), entre L et C qui se trouvent chez le même abonné ou

chez deux voisins. La tension de s n'est qu'une fraction faible de la tension normale, mais elle peut suffire pour faire monter au delà de cette valeur normale les tensions de résonance aux bornes de L et C . Mais cette disposition de survolteur est défectueuse, pour encore d'autres raisons, et on ne doit jamais laisser le primaire en dehors de l'action du disjoncteur.

On trouverait des possibilités de résonances dangereuses dans le cas du triphasé en étoile, hors surtout de la présence de connexions en triangle. On trouve alors des sources de forces électromotrices assez élevées, de fréquences harmoniques, 3 notamment, dans les branches de l'étoile. Des condensateurs placés entre les fils extrêmes et le neutre de l'étoile pourraient aussi entrer localement en résonance. Mais on sait aussi que ces réunions de centres d'étoiles ne doivent pas s'effectuer sans précautions.

7. — Formule générale.

On a, au départ, une tension U , et entre le départ et l'arrivée une résistance r et une inductance L . Cette inductance est celle de la ligne si U est maintenu constant au départ de cette ligne. Si, au contraire, le courant I réagit sur la tension U , par exemple s'il y a des transformateurs restant hors du réglage de la tension, ou bien si l'on ne maintient pas la tension des machines, mais simplement leur flux ou plutôt leur excitation, cela revient à supposer une tension constante et à intercaler une inductance représentant de la dispersion ou de la réaction d'induit. Cette inductance supplémentaire s'ajoute alors à celle de la ligne dans la valeur de L qui tient compte de l'ensemble.

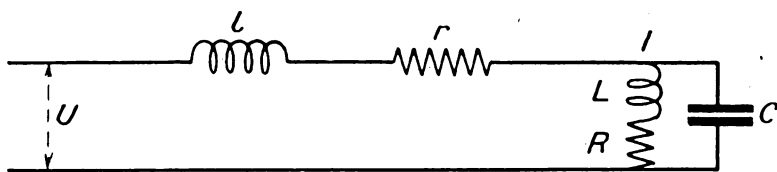


Fig. 7. — Circuit d'utilisation avec inductance et résistance en série et capacité en dérivation.

A l'arrivée, on a un circuit d'utilisation qu'on peut représenter par une inductance L en série avec une résistance R ; on ajoute un condensateur C (fig. 7). L'impédance totale du circuit est

$$Z = r + j\omega + \left[\frac{-\frac{j}{C\omega} (R + jL\omega)}{R + jL\omega - \frac{j}{C\omega}} \right]$$

L'impédance à l'arrivée Z' est égale au crochet,

Donc :
$$U_c = U \frac{Z'}{Z}.$$

En résolvant, on trouve :

$$U_c = U \frac{N}{D}.$$

$$N = L\omega[RrC\omega + L\omega - l\omega(\omega^2LC - 1)] - R[r(\omega^2LC - 1) + R(\omega^2/C - 1)] \\ - jR[RrC\omega + L\omega - l\omega(\omega^2LC - 1)] - jL\omega[r(\omega^2LC - 1) + R(\omega^2/C - 1)].$$

$$D = [RrC\omega + L\omega - l\omega(\omega^2LC - 1)]^2 + [r(\omega^2LC - 1) + R(\omega^2/C - 1)]^2.$$

Cette formule est peu commode pour les discussions. Il faut la modifier de telle façon que les applications en soient faciles dans le cas qui nous occupe plus spécialement, celui qui intéresse les distributeurs. Il faut notamment faire disparaître les coefficients L supposés chez les abonnés, dont ils ne se servent ordinairement pas ni les uns ni les autres, au reste de signification peu simple en présence de fer saturé :

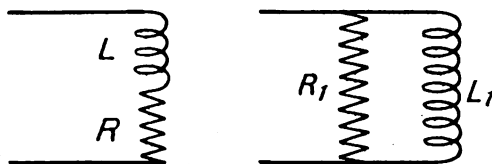


Fig. 8. — Substitution d'une inductance et d'une réactance en dérivation à l'inductance en série.

Au lieu de prendre comme schéma de la charge L et R en série, nous pouvons prendre L_1 et R_1 en dérivation (fig. 8). Il nous suffit d'écrire :

$$R + jL\omega = \frac{jL_1\omega R_1}{jL_1\omega + R_1},$$

d'où :

$$L_1 R_1 = L_1 R + L R_1,$$

$$R R_1 = L L_1 \omega^2,$$

deux équations, déterminant L_1 et R_1 .

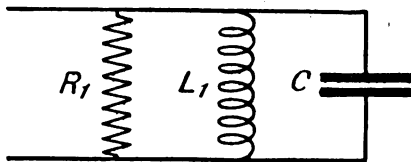


Fig. 9. — Adjonction au montage précédent d'une capacité en dérivation.

En adjoignant une capacité en dérivation, nous avons la figure 9 ;

l'ensemble de L_1 et C sera équivalent à une capacité unique apparente

$$C_A = C - \frac{1}{\omega^2 L_1}.$$

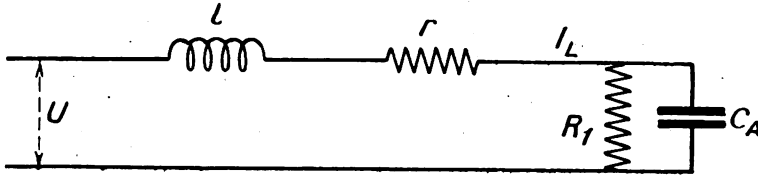


Fig. 10. — Système total considéré pour la recherche des surtensions.

Finalement, il nous suffira de considérer le système total de la figure 10, pour lequel la formule générale ci-dessus devient :

$$U_c = U \frac{[r - R_1(\omega^2 LC_A - 1)] - j[R_1 r C_A \omega + l\omega]}{[r - R_1(\omega^2 LC_A - 1)]^2 + [R_1 r C_A \omega + l\omega]^2},$$

ou, en valeurs efficaces :

$$U_c = U \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{r}{R_1} - (\omega^2 LC_A - 1)\right]^2 + \left[r C_A \omega + \frac{l\omega}{R_1}\right]^2}}.$$

L'harmonique d'ordre h , ayant au départ la tension U_h aura à l'arrivée la tension U_{ch} :

$$U_{ch} = U_h \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{r}{R_1} - (h^2 \omega^2 LC_A - 1)\right]^2 + h^2 \left[r C_A \omega + \frac{l\omega}{R_1}\right]^2}}.$$

La plus grande surtension possible, pour $\omega^2 LC_A = 1$ ou $h^2 \omega^2 LC_A = 1$ en même temps que $R_1 = \infty$, sera :

$$U \frac{1}{r C \omega} \quad \text{pour l'onde fondamentale,}$$

$$U_h \frac{h r C \omega}{1} \quad \text{pour l'harmonique } h^{ème}.$$

La résonance de l'onde fondamentale est en général, on peut dire toujours, impossible. En effet, la puissance réactive dissipée dans le transport, pour la pleine charge avec courant I_L , est $l\omega I_L^2$. Elle ne peut être qu'une fraction $\frac{1}{k}$, avec $k > 1$, de la puissance apparente totale $U_c I_L$.

D'autre part appelons P_c l'excès de puissance réactive apportée par les condensateurs sur la compensation exacte ; elle a pour valeur

$$P_c = \omega C_A U_c^2.$$

Ecrire $\omega^2 LC_A = 1$ revient à écrire $P_c = k U_c I_L$. Cet excès de puis-

sance réactive apportée par les condensateurs sur la compensation exacte, devrait être k fois la puissance apparente nominale du feeder, et généralement k est 5 ou 10.

Mais la résonance des harmoniques peut se produire.

Faisons $k = 5$; pour l'harmonique 3 écrivons $9\omega^2/C_A = 1$, il en résulte $\omega^2/C_A = 0,111$ et :

$$P_c = \frac{U_c I^2}{1,8} = 0,555 U_c I_L.$$

Il suffit alors d'avoir un excès de puissance réactive fournie par les condensateurs, comptée à la fréquence normale, de la moitié environ de la puissance apparente nominale du feeder. Pour l'harmonique 7 ce serait seulement un dixième au lieu de la moitié. La surtension pour $R_1 = \infty$, c'est à-dire sans aucune charge à l'arrivée, avec une perte en ligne à pleine charge égale à 5 pour cent de la puissance nominale du feeder, serait 12 pour l'harmonique 3 et 28 pour l'harmonique 7.

Mais peut-on poser $R_1 = \infty$? il y a toujours de la charge, faible souvent il est vrai. Il faut donc voir comment cette charge agit pour réduire les surtensions.

Nous ferons encore une autre transformation de formule, en adoptant uniquement les caractéristiques généralement en usage chez les distributeurs.

8. — Formule pratique.

Appelons, pour la tension normale et le courant de pleine charge du feeder :

- a le rapport de la puissance active perdue dans le feeder à la puissance apparente nominale du feeder.
- b le rapport de la puissance réactive absorbée par la transmission, depuis le lieu du maintien d'une tension U sinusoïdale constante en un point de départ, à la puissance apparente nominale du feeder.
- A le rapport de la puissance active fournie à l'arrivée par le feeder au moment considéré à la puissance apparente nominale du feeder.
- B le rapport de la puissance réactive en excès à l'arrivée, au-dessus de la compensation exacte pour la fréquence fondamentale, au moment considéré, à la puissance apparente nominale du feeder.

Nous avons alors :

$$U_c = U \frac{1}{\sqrt{(bB - aA - 1)^2 + (aB + bA)^2}}$$

$$U_{ch} = U_h \frac{1}{\sqrt{(h^2 bB - aA - 1)^2 + h^2 (aB + bA)^2}}.$$

La surtension ou amplification maximum à craindre pour un harmonique, avec $A = 0$ et résonance $h^2 b B = 1$, est ainsi $h \frac{b}{a}$. Si $\frac{b}{a} = 4$, soit quatre fois plus de perte réactive que de perte active dans la transmission, elle est $4h$, soit 12, 20, 28, 36, 44, 52... pour les harmoniques 3, 5, 7, 9, 11, 13... Les courbes à l'arrivée seraient ainsi très déformées, même si elles ne contiennent au départ qu'une proportion faible de tensions harmoniques, comme quelques centièmes, par rapport à la tension fondamentale. Mais ces coefficients sont exagérés, car il y aura toujours une charge active, si petite soit-elle, et même très faible elle abaisse beaucoup l'amplification des tensions à l'arrivée comme nous allons le voir ; cette charge est amenée par des transformateurs à vide, par quelque appareil d'utilisation autre que les condensateurs, par ces condensateurs eux-mêmes dont la perte proportionnelle croît quelquefois très sensiblement, avec la fréquence.

La perte a dans la transmission augmente, quelquefois rapidement, avec le rang de l'harmonique. L'effet Kelvin réduit l'épaisseur utile des conducteurs, comme à celle d'une peau de 0,3 cm à la fréquence 450 p/s, cette diminution de l'épaisseur utile se faisant comme l'accroissement de la racine carrée de la fréquence. Si la résistance double pour l'harmonique 9, la surtension ou amplification de l'harmonique, au lieu de 36 dans l'exemple précédent, tombe à 18. Il faut considérer aussi les autres dissipations de puissance dans la transmission, en les englobant dans une certaine augmentation de a : induction dans les corps voisins comme armures de câbles ou supports, effluves, etc., toutes croissant avec la fréquence.

9. — Exemple.

Un feeder est caractérisé par $a = 0,05$; $b = 0,20$ en pertes active et réactive.

On dispose, à l'arrivée, des condensateurs en dérivation et on les laisse en excès, donnant ainsi un excès de puissance réactive B fois la puissance apparente nominale du feeder. Soit $\text{Tg } \varphi = -\frac{B}{A}$ le déphasage mesuré à l'arrivée.

1° $B = 0,102$; il y a résonance de l'harmonique 7.

A charge active relative	Amplifications des tensions à l'arrivée par rapport aux tensions au départ				Déphasage à l'arrivée	
	fonda- mental	harm. 3	harm. 5	harm. 7	tg φ	cos φ
0	1,02	1,22	2,04	28	$-\infty$	0
0,1	1,01	1,21	1,99	5,7	- 1,02	0,71
0,2	1,00	1,19	1,82	3,2	- 0,51	0,89
0,5	0,99	1,11	1,36	1,42	- 0,20	0,98
1,0	0,95	0,93	0,88	0,71	- 0,10	0,99

2° $B = 0,2$; il y a résonance de l'harmonique 5.

A	Amplifications des tensions				Déphasage à l'arrivée	
	fonda- mental	harm. 3	harm. 5	harm. 7	tg φ	cos φ
0	1,04	1,56	20 0	1,03	$-\infty$	0
0,1	1,03	1,53	6,7	1,04	- 2	0,45
0,2	1,02	1,50	4,0	0,99	- 1	0,707
0,5	1,01	1,35	1,82	0,83	- 0,4	0,93
1,0	0,97	1,07	0,95	0,58	- 0,2	0,98

3° $B = 0,555$; il y a résonance de l'harmonique 3.

A	Amplifications des tensions				Déphasage à l'arrivée	
	fonda- mental	harm. 3	harm. 5	harm. 7	tg φ	cos φ
0	1,12	12	0,56	0,22	$-\infty$	0
0,1	1,11	7,0	0,56	0,22	- 5,55	0,18
0,2	1,11	4,9	0,55	0,22	- 2,78	0,34
0,6	1,08	2,6	0,53	0,22	- 1,11	0,67
1,0	1,03	1,11	0,48	0,22	- 0,555	0,87

4° $B = 1$.

A	Amplifications des tensions				Déphasage à l'arrivée	
	fonda- mental	harm. 3	harm. 5	harm. 7	tg φ	cos φ
0	1,25	1,23	0,25	0,11	$-\infty$	0
0,1	1,24	1,21	0,25	0,11	- 10	0,10
0,2	1,23	1,20	0,25	0,11	- 5	0,20
0,5	1,19	1,12	0,25	0,11	- 2	0,45
1,0	1,13	0,94	0,24	0,11	- 1	0,707

Les harmoniques d'ordre plus grand que 7 entreraient en résonance pour des valeurs de B plus petites, soit :

h	B
9	0,061
11	0,041
13	0,029
15	0,022

Ces valeurs de B sont faibles. Quelques centièmes de puissance réactive fournie en excès par les condensateurs, sont inévitables si l'emploi de ces appareils se développe.

Les déformations également inévitables de la courbe de tension si ces harmoniques élevés existent à l'origine, sont atténuées très fortement, comme nous l'avons vu, par la dissipation de puissance dans le feeder, par les pertes mêmes des condensateurs, par la petite charge qui existe toujours.

Il faut remarquer que, plus l'ordre de l'harmonique est élevé, plus la surtension théorique sans charge est importante, mais aussi que plus la surtension avec 0,1 de la charge est petite. Cette surtension, est à très peu près, au maximum, quand il y a résonance de l'harmonique h :

$$\frac{1}{\frac{a}{hb} + hbA} \quad \text{au lieu de} \quad \frac{hb}{a} \quad \text{à vide.}$$

Dans notre exemple $b = 0,2$; $a = 0,05$; $A = 0,1$. On a donc

$$\frac{1}{\frac{1}{4h} + 0,02h} \quad \text{au lieu de} \quad 4h \quad \text{à vide.}$$

Cela donne :

h	Surtension		h	Surtension	
	sans charge	0,1 charge		sans charge	0,1 charge
3	12	7,0	11	4,1	4,1
5	20	6,7	13	3,6	3,6
7	28	5,7	15	3,2	3,2
9	36	4,8	17	2,8	2,8

Remarquons encore que ces surtensions extrêmes ne surviennent pas toutes à la fois. Quand l'une d'elles existe pour un harmonique, les autres ne sont que très peu augmentées ou elles sont réduites. Enfin,

a croissant de lui-même avec h , les valeurs ci-dessus sont exagérées d'autant plus que l'harmonique est de rang plus élevé.

En somme, les déformations de la courbe de tension restent pratiquement modérées en général, sauf pour les premiers harmoniques. Mais la résonance de ceux-ci n'a lieu que lorsque l'excès de puissance réactive fournie par les condensateurs est relativement considérable. L'exploitant peut l'empêcher, en ne tolérant pas que les usagers déphasent le courant trop en avant. Ceux-ci doivent prendre des mesures afin que la quantité de condensateurs en service chez eux soit appropriée, avec une large tolérance du reste, à leurs besoins de puissance réactive. Autrement dit, il ne faut pas tolérer que le facteur de puissance des usagers tombe au-dessous d'une certaine valeur, avec courant en avant [indépendamment de toute idée de tarification]. Dans l'exemple ci-dessus, qui est un exemple moyen, on voit qu'en ne tolérant pas au-dessous de $\cos \varphi = 0,8$, $\operatorname{tg} \varphi = -0,75$, pour le feeder, on n'aura guère de déformations des courbes plus grandes à l'arrivée qu'au départ,

Cependant, il peut en être autrement dans certains cas particuliers, notamment sur d'anciens réseaux ayant une courbe de tension à l'origine assez différente de la sinusoïde.

On doit remarquer que les harmoniques d'ordre multiple de 3 sont, en général, absents des montages triphasés symétriques. Mais ils peuvent réapparaître en cas de dissymétries ou quand l'on charge les phases séparément en se servant du neutre.

10. — *Mise en circuit des condensateurs : surtensions, surintensités.*

Un condensateur mis brusquement sous tension équivaut quelquefois à un court-circuit.

Soit $u = U \cos (\omega t - \varphi)$ la tension appliquée à un condensateur n'ayant en série qu'une faible résistance R et une faible inductance L , correspondant quelquefois aux seuls conducteurs de liaison et à l'appareillage depuis l'endroit où U est maintenu constant; cela implique qu'on ne branche en une même fois que des condensateurs individuels de puissance réactive notablement inférieure à la puissance de la ligne d'alimentation.

Avec ces restrictions, les équations donnant le courant absorbé i et la tension aux bornes du condensateur u_c se simplifient

beaucoup. La fréquence d'oscillation naturelle est :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}},$$

et la pulsation d'oscillation naturelle :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL}}.$$

Ici L et C étant petits, ω_0 est grand, l'oscillation parasite à la fermeture est de fréquence assez élevée.

$$i = -UC\omega \left\{ \sin(\omega t - \varphi) + e^{-\frac{R}{2L}t} \left[\sin \varphi \cos \omega_0 t - \frac{\omega_0}{\omega} \cos \varphi \sin \omega_0 t \right] \right\}.$$

$$u_c = U \left\{ \cos(\omega t - \varphi) \right.$$

$$\left. - e^{-\frac{R}{2L}t} \left(\cos \varphi \cos \omega_0 t + \left[\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \cos \varphi - \frac{\omega}{\omega_0} \sin \varphi \right] \sin \omega_0 t \right) \right\}.$$

Les deux cas extrêmes se rapportent à la fermeture au passage de u à zéro pour $\varphi = \mp \frac{\pi}{2}$, ou au passage de u au maximum pour $\varphi = 0$ ou π . Examinons ces deux cas extrêmes ; dans les positions intermédiaires, on aura également des résultats intermédiaires.

$$1^\circ \quad \varphi = \mp \frac{\pi}{2}, \quad \cos \varphi = 0, \quad \sin \varphi = \mp 1, \quad u = \mp U \sin \omega t$$

$$i = UC\omega \left\{ \mp \cos \omega t \pm e^{-\frac{R}{2L}t} \cos \omega_0 t \right\}.$$

Le courant est celui de régime $\mp UC\omega \cos \omega t$ auquel s'ajoute, en se plaçant de telle sorte que pour $t = 0$ on ait $i = 0$, condition indispensable, une oscillation de fréquence f_0 amortie exponentiellement.

Comme $\frac{R}{L}$ est assez grand pour un circuit de fils droits, l'amortissement est ordinairement rapide. Le maximum de courant instantané est plus petit que le double du courant maximum en régime. La valeur efficace du courant combiné, au départ pendant un temps court, est limitée à moins de 1,4 fois la valeur efficace du courant de régime.

$$u_c = \mp U \left\{ \sin \omega t + e^{-\frac{R}{2L}t} \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right\},$$

$\frac{\omega}{\omega_0}$ est faible ; u_c ne diffère pas beaucoup de u , ce qui est évident, puisque ces deux tensions ne sont séparées que par une résistance et une inductance faibles traversées par un courant modéré.

2° $\varphi = 0$, $\sin \varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$, $u = U \cos \omega t$, et de même au signe près pour $\varphi = \pi$,

$$i = -UC\omega \left\{ \sin \omega t - e^{-\frac{R}{2L}t} \frac{\omega_0}{\omega} \sin \omega_0 t \right\}.$$

Au courant de régime $-UC\omega \sin \omega t$ se superpose un courant de fréquence f_0 avec coefficient :

$$e^{-\frac{R}{2L}t} \frac{\omega_0}{\omega} \sin \omega_0 t.$$

$\frac{\omega_0}{\omega}$ est grand et ce courant parasite peut devenir fort élevé, théoriquement infini si $L = 0$ et $\omega_0 = \infty$. En pratique, il est grand et s'amortit vite; il a des inconvénients, comme de faire sauter les fusibles des condensateurs.

$$u_c = U \left\{ \cos \omega t - e^{-\frac{R}{2L}t} \left[\cos \omega_0 t + \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \right] \right\}.$$

La surtension due au terme parasite s'ajoutant à la tension normale peut aussi devenir élevée si $\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ est grand.

Quoique les tensions u_c et u soient séparées par une résistance et une inductance faibles, elles peuvent différer beaucoup parce que le courant est élevé.

Il est donc meilleur de ne jamais mettre des condensateurs en service sans précaution, surtout si leur capacité est un peu élevée. On intercale une résistance R_0 que l'on supprime d'un coup ou par échelons. Une bonne solution est de faire cette résistance assez élevée pour que la charge devienne exponentielle et non oscillatoire; il faut faire :

$$R_0 \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

On ne connaît pas L en général, cette inductance étant celle des canalisations depuis un point d'ailleurs assez indéterminé. Appelons cependant β le rapport de la puissance réactive $L\omega I^2$ (I étant le courant normal pris par le condensateur) que cette inductance retire de la puissance réactive du condensateur P_n

$$R_0 I^2 \geq 2\beta P_n,$$

β est variable selon les installations et mal déterminé, mais heureusement il n'intervient que par sa racine carrée.

Admettons qu'il se tienne entre $\frac{1}{100}$ et $\frac{1}{16}$, soit 1 à 6 pour 100 de puissance réactive du condensateur détruite par son appareillage; alors $R_0 I^2 \geq 0,2$ à $0,5 P_n$.

Ainsi se justifierait la règle indiquée par des constructeurs, de placer une résistance intermédiaire qui absorberait environ la moitié de la puissance des condensateurs.

En régime, après un temps très court, il s'établit un courant I , la tension aux bornes de la batterie est $\frac{I}{C\omega}$ et aux bornes de la résistance $RI = 0,5 \frac{I}{C\omega}$. Ces deux tensions étant en quadrature on aura aux bornes de la résistance 0,45 de la tension appliquée, et aux bornes du condensateur 0,89 de cette tension.

On admet ainsi à la fermeture un courant assez peu au-dessus du courant normal, pendant un temps court. Puis au bout de quelques instants la tension aux bornes du condensateur devient voisine de celle de la ligne et avec un faible déphasage. On supprime alors R_0 d'un seul coup en mettant la résistance en court-circuit, ce qui se fait encore sans appel de courant exagéré.

Dans le cas de très grosses batteries, il vaut mieux faire R_0 un peu plus grand et le supprimer au moyen de plusieurs plots.

Il faut noter que si le condensateur est en service et que le disjoncteur général de l'installation fonctionne, sa fermeture, avec le condensateur en position de marche peut appeler un courant exagéré et une surtension. Il est donc bon, si cette éventualité est à craindre par suite de la disposition de l'appareillage, de munir le condensateur d'un disjoncteur fonctionnant à manque de tension.

Il est meilleur de laisser les condensateurs inutilisés, en court-circuit ou fermés sur une résistance, car ils sont très bien isolés, ils peuvent amener des chocs dangereux à ceux qui les toucheraient. De plus, les courants et tensions parasites, lors de leur fermeture, peuvent augmenter si les condensateurs sont déjà chargés. On doit donc placer en dérivation, lors de l'ouverture, une résistance de décharge qui peut être la résistance même de mise en service. On a placé aussi des résistances fixes élevées restant en permanence, n'absorbant qu'une puissance active fraction faible, comme quelques millièmes, de la puissance réactive ; la tension aux bornes du condensateur abandonné baisse exponentiellement avec le temps, selon $e^{-\frac{t}{RC}}$.

11. — *Emploi d'un condensateur avec une petite inductance en série.*

Un condensateur placé sous la tension :

$$u = U \cos \omega t + U_3 \cos (\omega t - \chi_3) + U_5 \cos (\omega t - \chi_5) + \dots$$

absorbe un courant relativement déformé d'autant plus que le rang de l'harmonique est plus élevé,

$$-i = C\omega U \sin \omega t + 3C\omega U_3 \sin (\omega t - \chi_3) + 5C\omega U_5 \sin (\omega t - \chi_5) + \dots$$

Cette déformation est peu désirable quand elle est exagérée, d'autant plus qu'un tel courant fait généralement chauffer le condensateur plus que le courant de fréquence fondamentale produit par une onde sinusoïdale de même valeur efficace.

Pour réduire la déformation, on peut disposer en série une induc-

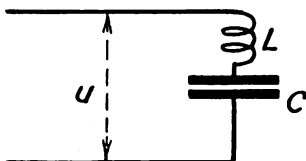


Fig. 11. — Condensateur avec faible inductance en série.

tance L (fig. 11) n'absorbant pour l'onde fondamentale pure, qu'une proportion k de la puissance réactive du condensateur ($k < 1$).

$$I\omega = k \frac{1}{C\omega} \quad \text{ou} \quad \omega^2 LC = k.$$

Pour l'onde fondamentale : $I = \frac{UC\omega}{1 - k}$

La tension sur l'inductance : $U_L = \frac{Uk}{1 - k}$.

La tension sur le condensateur : $U_c = \frac{U}{1 - k}$.

On désire fournir une puissance réactive donnée :

$$U_c I - U_L I = \frac{U^2 C \omega}{1 - k}$$

au lieu de $U^2 C_0 \omega$ pour un condensateur sans inductance en série. Le prix est inutilement augmenté, ce qui est évident.

Ce résultat est sans intérêt, mais il faut voir ce que deviennent les harmoniques. Les tensions de ceux-ci s'accumulent sur l'inductance, car elles sont proportionnelles au rang h de l'harmonique alors que les tensions sur le condensateur sont affectées de $\frac{1}{h}$.

Le courant harmonique est :

$$I_h = \frac{h U_h C \omega}{1 - h^2 k},$$

le dénominateur étant pris en valeur absolue, sans signe, donc pour

un certain rang et au-dessus :

$$I_h = \frac{hU_h C \omega}{h^2 k - 1}.$$

Pour réduire I_h au-dessous de $hU_h C \omega$ obtenu sans addition de l'inductance L il faut :

$$h^2 k - 1 \geq 1,$$

$$h^2 k \geq 2 \quad \text{ou} \quad k \geq \frac{2}{h^2}.$$

Ainsi, lorsqu'on désire réduire l'harmonique 7, il faut prendre $k > 0,04$ avec un condensateur de capacité réduite $C \leq 0,96C_0$.

En général $C = C_0(1 - k)$; il faut donc *diminuer* la capacité du condensateur quand on ajoute l'inductance, mais on augmente automatiquement la tension fondamentale aux bornes dans le rapport

$\frac{1}{1-k}$. De cette façon, la puissance réactive du condensateur est multipliée par :

$$(1 - k) \left(\frac{1}{1 - k} \right)^2 = \frac{1}{1 - k}$$

par rapport à la puissance réactive à produire finalement à la fréquence fondamentale. L'inductance absorbe $\frac{k}{1 - k}$.

Ceci établi, on peut se poser différents problèmes.

Un premier consiste à partir d'une puissance réactive immuable pour la fréquence fondamentale, qui serait obtenue avec le condensateur de capacité C_0 avec $L = 0$, soit $U^2 C_0 \omega$, puis se proposer de réduire l'amplitude de tous les courants harmoniques 3 et au delà, en ajoutant une inductance.

Pour $h = 3$, il faut $k \geq \frac{2}{9}$ ou $k \geq 0,222$. Par raison d'économie, on doit prendre k aussi petit que possible. Faisons $k = 0,25$. Alors :

h	Courant réduit à
3	0,8
5	0,49
7	0,097
9	0,052

La capacité nécessaire est $C = 0,75C_0$. La tension à ses bornes, pour l'onde fondamentale, monte à $1,33U_0$. La puissance réactive du condensateur est $1,33U^2 C_0 \omega$ et celle de l'inductance $0,333U^2 C_0 \omega$ pour l'onde fondamentale.

Le prix du condensateur, à sécurité égale pour l'onde fondamentale, est multiplié par 1,33 et si on ajoute le prix de l'inductance, moins coûteuse par unité de puissance, on arrive à 1,4 à 1,5 fois le prix du condensateur sans inductance.

S'il n'y avait pas d'harmonique 3 et qu'on veuille réduire tous les harmoniques à partir de 5 et au delà, il suffirait de faire $k \geq \frac{2}{25}$ ou $k \geq 0,08$. On prendrait 0,10 et le condensateur ne serait que 1,11 fois plus puissant que sans inductance.

Un second problème peut se poser : un condensateur a été installé; on constate qu'il est traversé par des courants harmoniques trop considérables; on introduit une inductance de $k = 0,25$, c'est-à-dire de puissance réactive égale au quart de celle du condensateur avec même courant.

Alors la tension fondamentale aux bornes du condensateur monte à 1,33 fois U ; il est en surcharge. Cette surcharge lui convient-elle? C'est un cas d'espèce, puisque si ce condensateur est soumis à 1,33 fois la tension fondamentale, par contre tous les courants et tensions harmoniques sont fortement atténués.

h	Répartition de la tension entre		Courant par rapport à celui sans inductance
	Condensateur	Inductance	
1 (fonda.)	1,333	0,333	1,333
3	0,8	1,8	0,8
5	0,19	1,19	0,19
7	0,097	1,097	0,097
9	0,052	1,052	0,052
11	0,034	1,034	0,034

Par exemple, si le courant absorbé était :

$$10 \cos \omega t + 2 \cos (3\omega t + \chi_3) + 1,5 \cos (5\omega t + \chi_5) + 2,5 \cos (7\omega t + \chi_7) + \cos (11\omega t + \chi_{11}) + \dots$$

il devient après l'addition de l'inductance :

$$13,3 \cos \omega t + 1,6 \cos (3\omega t + \chi_3) + 0,27 \cos (5\omega t + \chi_5) + 0,25 \cos (7\omega t + \chi_7) + 0,034 \cos (11\omega t + \chi_{11}) + \dots$$

S'il se trouvait que le condensateur supportât aussi bien le second courant composé que le premier, alors on serait arrivé à ce résultat, paradoxal en apparence, d'augmenter la puissance réactive produite en ajoutant une inductance.

Revenons au cas général. Il faut remarquer que l'on est conduit à prendre $\omega^2 LC < 1$ pour l'onde fondamentale et $h^2 \omega^2 LC > 1$ pour tous les harmoniques. Si on le fait à partir de 3, il n'y a jamais de résonance à craindre. Il n'y a pas d'harmoniques pairs dans la grande majorité des cas. En particulier l'harmonique 2 ne se rencontre à peu près jamais. Il résonnerait pour $k = 0,25$ précisément.

Avec ce montage, il faut craindre les variations accidentelles de la fréquence, quand elles sont possibles (usines hydrauliques notamment). Ainsi avec $k = 0,25$, on a :

$$h^2 \omega^2 LC = h^2 k.$$

Si la pulsation passe à ω' , la condition de résonance devient :

$$\left(\frac{\omega'}{\omega}\right)^2 h^2 k = 1 \quad \text{ou} \quad \left(\frac{\omega'}{\omega}\right) = \frac{2}{h} \quad \text{dans notre exemple.}$$

$$\text{Pour } h = 3 \quad \text{il faut avoir} \quad \frac{\omega'}{\omega} = \frac{2}{3} = 0,667,$$

$$» \quad h = 5 \quad » \quad \frac{\omega'}{\omega} = \frac{2}{5} = 0,40, \text{ etc.}$$

Si la vitesse de l'alternateur tombe à $\frac{2}{3}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{2}{7}$, etc... les harmoniques 3, 5, 7... résoneront et le condensateur sera en surtension et surintensité dangereuses. Ces résonances se produiraient si l'on mettait progressivement en vitesse un alternateur excité et fermé sur le réseau.

L'addition de telles inductances ne doit donc pas se faire sans précautions.

CONDENSATEURS EN SÉRIE.

12. — *Emploi de condensateurs en série pour la réduction des chutes de tension dans les conducteurs.*

On interrompt le fil d'alimentation, et on place en série un condensateur de capacité K (fig. 12).

La chute de tension passe approximativement de :

$$\text{à :} \quad \frac{I(r \cos \varphi + l\omega \sin \varphi)}{I \left[r \cos \varphi + \left(l\omega - \frac{1}{K\omega} \right) \sin \varphi \right]}.$$

On peut ainsi, en faisant :

$$l\omega = \frac{1}{K\omega} \quad \text{ou} \quad \omega^2 lK = 1,$$

supprimer la partie réactive de la chute de tension, ce qui est particulièrement avantageux dans le cas des distributions aériennes.

On peut aussi faire la chute de tension nulle, pour une valeur donnée χ du déphasage :

$$r \cos \chi + \left(l\omega - \frac{1}{K\omega} \right) \sin \chi = 0.$$

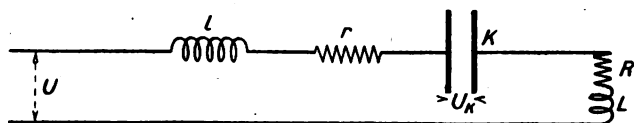


Fig. 12. — Montage d'un condensateur en série pour supprimer la partie réactive de la chute de tension.

Les tensions à l'arrivée et au départ sont alors égales pour un certain déphasage quel que soit le courant. Si le déphasage change et devient φ , la chute de tension devient :

$$rI \left(\cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{\tan \chi} \right)$$

qui reste assez faible.

Ainsi, faisons $\cos \chi = 0,707$, les chutes de tension deviennent

$\cos \varphi = 1,$	$rI,$
$\cos \varphi = 0,8,$	$0,2rI,$
$\cos \varphi = 0,707,$	$0,$
$\cos \varphi = 0,6,$	$-0,2rI,$
$\cos \varphi = 0,$	$-rI.$

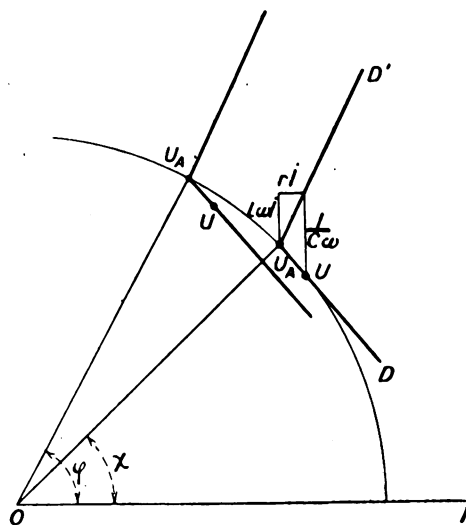


Fig. 13. — Diagramme des tensions U au départ pour une tension constante U à l'arrivée.

Le diagramme de la figure 13 donne la tension U au départ pour U_i

constant à l'arrivée. Pour toutes valeurs de φ , on trouvera l'extrémité de U sur les droites parallèles à D. U reste à peu près constant lorsque $\varphi = \chi$, l'arc de cercle étant assimilé à la droite. U ne varie que peu pour les autres déphasages même éloignés de χ . Sans condensateur, l'extrémité de U se trouverait sur les droites D'.

On obtient donc avec cette disposition une bonne correction de la chute de tension. Il y a aussi évidemment apport par le condensateur d'une puissance réactive que l'on n'a pas à engendrer autrement.

13. — Tension aux bornes du condensateur.

En nous reportant à nos formules générales, nous obtenons :

$$U_k = U \frac{1}{\sqrt{(LK\omega^2 - 1 + LK\omega^2)^2 + (R + r)^2 K^2 \omega^2}}$$

Comme on fait généralement ω très voisin de $\frac{1}{K\omega}$,

$$U_k = U \frac{1}{K\omega\sqrt{(R + r)^2 + L^2\omega^2}}$$

Mais alors :

$$\frac{U}{I} = \sqrt{(R + r)^2 + L^2\omega^2}$$

$$\omega I^2 = U^2 C \omega = \frac{1}{M} UI,$$

$$U_k = \frac{U}{M}.$$

Si ωI^2 , puissance réactive consommée par la ligne est $\left(\frac{1}{M}\right)^{\text{ème}}$ de la puissance apparente distribuée à un certain instant, la tension aux bornes du condensateur est alors $\frac{1}{M}$ de la tension totale du réseau.

Si l'on a calculé le condensateur pour une tension dite normale, correspondant au courant de pleine charge, toute surcharge en courant du réseau provoquera une surtension du condensateur. A la limite, pour un court-circuit parfait, la tension aux bornes du condensateur atteint la tension totale du réseau au lieu d'une assez faible fraction.

14. — Application, appareillage.

Une application de ce dispositif a été faite en assez grand à Ballston (New-York) sur un réseau de 33 000 V triphasés, 60 p : s; elle fonctionne depuis août 1928. La réactance du feeder dans lequel on a inter-

calé les condensateurs est de 24 ohms par phase. Les trois conducteurs qui donnent $l\omega = \frac{1}{K\omega}$ sont ainsi de chacun 110 μF , 420 kVA, 3 170 V pour un courant normal de 132 A.

On a disposé une protection par éclateurs aux bornes des condensateurs; un arc s'amorce quand la tension du condensateur atteint 1,5 fois la tension normale. Le courant de cet arc actionne, par un relais extrêmement rapide, soit 0,01 sec, un dispositif de mise en court-circuit franche du condensateur. Si la surcharge disparaît, le condensateur est à nouveau et automatiquement intercalé.

L'efficacité de cet appareillage est basée sur l'instantanéité presque absolue de l'amorçage de l'arc entre les sphères de l'éclateur, et le fait que les condensateurs supportent sans danger des surtensions, même élevées, pendant le temps extrêmement court que demande l'éclatement de l'arc. Du reste, les surcharges, les courts-circuits, donnent lieu à une élévation du courant plus ou moins progressive, jamais tout à fait instantanée.

Les essais ont montré que la fermeture sur un circuit absorbant jusqu'à 75 fois le courant normal, exécutée à de nombreuses reprises, n'a pas endommagé les condensateurs.

Il faut toutefois remarquer que ces installations, avec condensateurs en série, sont encore très peu nombreuses; leur entrée pratique dans l'art de la distribution ne peut déjà être considérée comme accomplie.

15. — Tensions et courants harmoniques.

Puisque ω^2/K est toujours voisin de l'unité, et que L existe, c'est-à-dire si la charge à l'arrivée est déphasée en arrière, on a, *a fortiori*:

$$\omega^2(L + l)K > 1,$$

et encore plus :

$$h^2\omega^2(L + l)K > 1.$$

Il ne peut donc y avoir aucune résonance à craindre.

La tension harmonique d'ordre h aux bornes du condensateur, U_h étant la tension harmonique au départ est :

$$U_h = \frac{1}{\sqrt{[h^2(L + l)K\omega^2 - 1]^2 + (l + r)^2 h^2 K^2 \omega^2}}.$$

Cette tension est d'autant plus faible que h est plus grand, les tensions harmoniques se portant sur l'inductance de la ligne et celle de la charge, sans danger d'ailleurs.

Les courants harmoniques rencontrent une impédance d'autant plus grande que la fréquence est plus élevée et restent donc modérés. Cette impédance est :

$$\sqrt{\left[h(L+l)\omega - \frac{1}{hK\omega}\right]^2 + (R+r)^2}.$$

16. — Addition de condensateurs en dérivation.

Les usagers placés à l'extrémité du feeder, comme le distributeur lui-même, peuvent également disposer des condensateurs en dérivation afin d'améliorer le facteur de puissance, diminuer localement les

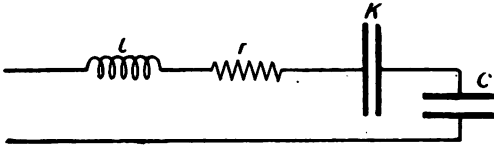


Fig. 14. — Adjonction d'une capacité C.

déphasages. Ils peuvent ainsi réduire artificiellement le coefficient L à appliquer; s'ils vont trop loin, ils peuvent l'annuler, puis lui substituer une capacité C (fig. 14).

La puissance réactive du condensateur K est bUI , en gardant à b la même définition que dans le § 8 : rapport de la puissance réactive absorbée par la transmission à la puissance apparente nominale du feeder $bUI = \frac{I^2}{K\omega}$.

Le condensateur de capacité C représente un excédent de puissance réactive en sus de la compensation à $\cos \varphi = 1$ de la charge du feeder, cet excédent étant dans un rapport B avec la charge nominale normale :

$$U^2 C \omega = BUI,$$

$$\text{d'où : } C = bBK.$$

b est plus petit que 1, généralement 0,2 ou 0,1; B est aussi plus petit que 1. Donc la capacité C est faible à côté de la capacité K . Quoique cette dernière représente, en général, une puissance réactive plus faible, elle fonctionne sous une tension bien plus petite, et celle-ci entre au carré dans la puissance réactive.

D'ailleurs pour l'onde fondamentale, l'effet de K est de supprimer

à peu près l'influence de la réactance de la transmission ; celle-ci peut donc encore moins entrer en résonance avec C.

En ce qui concerne les harmoniques, K est équivalent, dès que l'ordre est un peu élevé, à un court-circuit ou presque, sa résistance apparente étant $\frac{1}{hK\omega}$. S'il intervient encore ce ne peut être que favorablement.

LA LIMITATION DES COURT-CIRCUITS DANS LES RÉSEAUX A HAUTE TENSION ⁽¹⁾

par J. FALLOU.

Importance de la question. — Deux classes d'appareils : résistances ou réactances et appareils de désexcitation. — 1^{re} Catégorie : Court-circuits à la terre ; installations à phases séparées. — Court-circuits entre phases ; réactance propre des alternateurs ; bobines de réactance d'interconnexion ; bobines de réactance de feeders. — Réalisation matérielle des bobines de réactance. — 2^e Catégorie : Désexcitation des alternateurs et régulateurs d'intensité.

IMPORTANCE DE LA LIMITATION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT.

La limitation des effets des courants de court-circuit dans les réseaux à haute tension est un problème auquel les producteurs et distributeurs d'énergie électrique attachent justement une grande importance, car c'est de sa solution que dépendent les possibilités d'extension et d'interconnexion des centrales.

En effet, les puissances de plus en plus considérables mises en jeu aux sources de production d'énergie, rendraient vite impossible toute exploitation, tant des réseaux de transport, que des réseaux de distribution, si l'on ne pouvait limiter à des valeurs admissibles les courants de court-circuit.

Ceux-ci provoquent effectivement des accidents dont l'importance croît avec le carré de leur amplitude, aussi bien par les efforts électrodynamiques qu'ils développent entre les conducteurs voisins, soit dans les machines, soit dans les tableaux de distribution, que par les échauffements anormaux qui sont capables d'atteindre des valeurs extrêmement dangereuses au bout de temps très court, surtout lorsqu'il s'agit de câbles souterrains. Par ailleurs, bien que la technique des disjoncteurs dans l'huile ait rapidement progressé, on peut facilement concevoir de nouveaux réseaux où les appareils les plus modernes seraient insuffisants, et d'autre part les anciens réseaux de

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre, le jeudi 24 octobre 1929.

distribution alimentés par des centrales de plus en plus puissantes, doivent pouvoir fonctionner encore sans remaniements essentiels de leur matériel de sous-station.

Fort heureusement, ce problème est un de ceux que la technique moderne permet généralement de résoudre. Il n'existe pas évidemment de solution absolument générale, mais les moyens dont on dispose, judicieusement adaptés à chaque cas particulier, permettent de trouver dans chacun de ces cas une solution susceptible de donner satisfaction, de telle sorte qu'il est permis d'affirmer que le problème des courants de court-circuit n'est pas de ceux qui doivent constituer un obstacle à l'extension et à l'interconnexion des centres de production.

Dans ce rapport, rédigé à la demande de la quatrième section de notre Comité, nous n'avons donc aucune prétention de décrire des méthodes ou des procédés originaux, et nous passerons seulement en revue les différents éléments dont les exploitants disposent depuis longtemps déjà pour résoudre ce problème. Au cours de l'exposé, nous indiquons par quelques exemples numériques simples comment nous concevons l'application de ces procédés à la protection de réseaux très denses et de très grande puissance.

Deux classes d'appareils. — Pour diminuer l'amplitude des courants de court-circuit, il existe deux classes d'appareils dont le rôle et le mode de fonctionnement sont bien distincts. Dans la première classe nous rangeons les appareils passifs (résistances et réactances) que l'on peut intercaler aux endroits les plus judicieux; ces appareils limitent les courants de court-circuit dès leur établissement à des valeurs maxima qui dépendent uniquement de leurs dimensions; ils sont donc susceptibles, non seulement d'atténuer les échauffements exagérés dus à ces courants, et de faciliter le fonctionnement des interrupteurs, mais de diminuer les efforts électrodynamiques développés par les surintensités initiales. La seconde classe comprend les appareils de désexcitation des alternateurs et des machines synchrones; ils ne peuvent agir que sur le courant de court-circuit permanent et ne présentent d'intérêt sérieux que si l'on envisage une temporisation importante systématique ou accidentelle de l'ouverture des interrupteurs.

I. — COURT-CIRCUITS A LA TERRE.

Le fait que la grande majorité des défauts d'isolement se produisent ou tout au moins commencent à se produire entre phase et neutre, lie

intimement le problème des courants de court-circuit à celui de la mise à la terre du point neutre. Une étude de la limitation des courants de court-circuit oblige donc, bon gré mal gré, à aborder cette question si souvent controversée de la mise à la terre du neutre. Il semble d'ailleurs que si cette question est encore si discutée, c'est qu'elle ne comporte pas en réalité de solution générale et que, là comme ailleurs, une doctrine absolue ne peut que soulever des exceptions multiples dans ses applications.

Il est bien certain qu'au seul point de vue des courants de court-circuit, la solution consistant à fonctionner avec le neutre isolé constitue un avantage apparent considérable, puisqu'elle permet en principe au réseau de fonctionner sans à-coup et sans interruption en cas de mise à la terre d'une phase. Malheureusement, l'expérience a montré que cet avantage est souvent illusoire; dans le cas d'un réseau de câbles étendu, par exemple, le déséquilibre du courant de capacité lors de la mise à la terre d'une phase est tel qu'il rend impossible le fonctionnement permanent des alternateurs. On sait d'autre part que, dans le cas de lignes aériennes, les arcs à la terre intermittents engendrent des surtensions particulièrement dangereuses qui conduisent les plus vifs partisans du neutre isolé à installer des bobines d'extinction entre le neutre et la terre. Enfin, la sécurité de fonctionnement des lignes et des appareils à haute tension est certainement notablement accrue si, au moins en régime permanent, la tension de chaque phase par rapport au sol n'est pas susceptible de dépasser la valeur de la tension étoilée.

Les partisans du neutre directement à la terre arguent justement que cette disposition permet d'obtenir une sélection automatique rapide des défauts, et qu'elle évite l'élévation de la tension des phases saines par rapport au sol, au moment de la mise à la terre d'une autre phase.

Il semble bien que la vraie solution du problème soit, dans la majorité des cas, comprise entre ces deux dogmes. Il paraît, en effet, préférable de ne pas isoler le point neutre et de laisser circuler un courant assez important par le défaut, de manière à permettre un fonctionnement sûr et rapide des relais de protection, mais il paraît aussi que la connexion directe du neutre au sol, qui entraîne des courants de court-circuit et des chutes de tension particulièrement sévères, doit être elle-même évitée chaque fois qu'il est possible de le faire, c'est-à-dire certainement dans la majorité des cas, en exceptant peut-être *provisoirement* les réseaux à très haute tension (1).

(1) Au cours d'un récent voyage aux Etats-Unis, nous avons pu nous rendre

Le problème de la limitation des court-circuits à la terre, est donc bien facile à résoudre, puisqu'il suffit de disposer une impédance judicieusement calibrée dans la connexion du neutre au sol.

On peut se demander tout d'abord si cette impédance doit être constituée par une résistance ou par une bobine de self. La pratique courante actuelle veut que ce soit une résistance : d'après une statistique publiée dès 1923 ⁽²⁾, 80 pour cent des réseaux des distributions américaines alimentés à la tension des alternateurs (moins de 15 000 V) fonctionnent avec le neutre relié à la terre par une résistance dont l'ordre de grandeur est en moyenne de 0,6 à 0,7 ohm par millier de volts, de manière à limiter les courants à la terre aux environs de mille ampères.

Il n'est pas évident néanmoins que cette pratique doive se perpétuer et fournisse la meilleure solution.

Une telle résistance a pour premier inconvénient d'absorber une puissance considérable, qui rend son exécution extrêmement difficile et onéreuse dès qu'il s'agit de réseaux à tensions assez élevées : une résistance capable de 1 000 A sur un réseau à 60 000 V, absorberait, en effet, 35 000 kW, soit 97 kWh ou 83 500 calories pendant 10 secondes; si l'on veut limiter son échauffement à 200° C au bout de ce temps, elle devra comporter 4 tonnes de métal. Nous pouvons citer comme exemple les résistances de 30 ohms, installées dans divers postes à 66 000 V du réseau de la Commonwealth Edison Co à Chicago : chacune de ces résistances pèse près de 19 T, et occupe un volume d'environ 90 m³.

Par ailleurs, l'insertion d'une résistance présente l'inconvénient de surélever la tension des phases saines par rapport au sol à une valeur qui atteint celle de la tension composée pour une valeur limite relativement très faible de cette résistance, et qui peut même dépasser sensiblement la tension composée.

Enfin, lorsqu'on cherche à déterminer l'impédance en se plaçant au point de vue de la chute de tension consécutive à une mise à la terre, on trouve que, toutes choses égales par ailleurs, cette impédance peut être fixée à une valeur moins élevée si elle est constituée par une

compte qu'un revirement d'opinion extrêmement net se manifeste à cet égard, tant chez les constructeurs que chez les exploitants. La pratique de la mise à la terre directe du point neutre des réseaux à très haute tension, considérée en Amérique comme un dogme jusqu'à ces toutes dernières années, est en voie d'être abandonnée. C'est ainsi que la plupart des transformateurs à 220 000 volts commandés depuis 1928 aux différents constructeurs sont prévus avec une borne neutre isolée, permettant d'installer une impédance entre le point neutre et la masse.

(2) *Journal of the A. I. E. E.* — Septembre 1923.

bobine de self inductance que si elle est constituée par une résistance. Comme d'autre part, à valeur égale, la présence d'une réactance produit une surélévation des phases saines bien moins élevée que la présence d'une résistance ⁽¹⁾, on peut affirmer en changeant les données du problème que, toutes choses égales en ce qui concerne l'élévation de la tension des phases libres, l'emploi d'une réactance est supérieur à celui d'une résistance pour limiter à la fois les courants de court-circuit à la terre et les chutes de tension consécutives.

Par ailleurs, cette réactance de neutre est facile à réaliser : d'une part en effet, elle n'a pas besoin d'être complètement isolée de la masse, puisqu'une de ses extrémités est toujours reliée au sol, et d'autre part, comme elle n'est parcourue normalement par aucun courant, son enroulement peut être commodément réalisé sans précautions spéciales quant aux pertes et aux échauffements, ce qui permet de prévoir des solénoïdes longs à une seule couche dans lesquels les efforts électrodynamiques deviennent inoffensifs.

On peut objecter à l'emploi de cette réactance la possibilité de surtensions. A notre avis, cette objection n'est pas sérieusement fondée; entre autres arguments, on peut soutenir qu'une réactance de dimension très inférieure à celle d'une bobine de Petersen, ne saurait être plus dangereuse que cette bobine elle-même.

La détermination de l'impédance à insérer dans le point neutre est généralement facile à résoudre, si l'on se donne *a priori* les valeurs extrêmes que l'on peut tolérer en cas de court-circuit pour le courant, pour la chute de tension, pour l'élévation de tension des phases libres, et pour la puissance minimum nécessaire au fonctionnement des relais wattmétriques ⁽²⁾ de protection.

Connaissant les impédances synchrone z_d , inverse z_i , et monophasée z_0 du réseau [exprimées, par exemple, par la chute de tension en centièmes de la tension normale U_n qu'elles produiraient si elles étaient parcourues par le courant normal I_n], on calcule les courants et tensions par les formules suivantes :

Courant de court-circuit :

(1) Nous avons démontré (*Bulletin S. F. E.*, mars 1926), que si la valeur de la réactance monophasée ne dépasse pas celle de la réactance inverse, aucune surélévation de tension des phases libres n'est à craindre.

(2) La composante réactive de l'impédance monophasée étant toujours beaucoup plus élevée que la composante active, tant qu'il s'agit d'alternateurs, de transformateurs, et de lignes aériennes, et au moins égale à cette composante active s'il s'agit de câbles, il est naturel d'utiliser, pour la sélection, des relais wattmétriques actionnés par la composante réactive de la puissance monophasée.

$$I_{cc} = \frac{300}{z_d + z_i + z_0} I_n.$$

Composante synchrone de tension résiduelle :

$$U_d = \frac{z_i + z_0}{z_d + z_i + z_0} U_n.$$

Tension aux bornes des contacts de l'interrupteur à l'ouverture du court-circuit :

$$U_{cc} = \frac{z_d + z_i + z_0}{2z_i + z_0} U_n.$$

Tension des deux phases libres par rapport au sol :

$$V_2 = \frac{\sqrt{3}}{z(z_d + z_i + z_0)} [j(2z_i + z_0) - z_0\sqrt{3}] U_n,$$

$$V_3 = \frac{-\sqrt{3}}{z(z_d + z_i + z_0)} [j(2z_i + z_0) + z_0\sqrt{3}] U_n, \quad (j = \sqrt{-1}).$$

Composante monophasée de la puissance :
produit de la composante monophasée des courants :

$$I_0 = \frac{100}{z_d + z_i + z_0} I_n,$$

par la valeur conjuguée de la composante monophasée des tensions :

$$U_0 = \frac{-z_0}{z_d + z_i + z_0} U_n.$$

Toutes ces relations sont évidemment vectorielles. Pour obtenir les valeurs instantanées à l'établissement du court-circuit, il suffit de faire

$$z_d = z_i.$$

A titre d'exemple, considérons une centrale comprenant 5 groupes alternateurs-transformateurs de 75 000 kVA chacun, couplés en parallèle par la haute tension; les transformateurs branchés en étoile à la haute tension, débitent sur un réseau sous la tension de 60 000 V.

Les valeurs des impédances à pleine charge du réseau sont :

$$z_d = (42 + j.63)\%, \quad z_i = (5 + j.26)\%, \quad z_0 = j.10\%.$$

Si les points neutres de tous les transformateurs étaient reliés au sol, le courant de court-circuit instantané atteindrait 17 500 A et le courant de court-circuit permanent 10 000 A.

On cherche à établir une impédance de point neutre de manière à maintenir le courant de court-circuit à une valeur inférieure à 6 000 A, la tension synchrone résiduelle à plus de 80 pour cent de la tension normale, la puissance réactive monophasée à une valeur au moins égale à 4 pour cent de la puissance normale d'un groupe et enfin, la

surélévation de tension des phases libres à moins de 40 pour cent de la tension étoilée normale, une fois le court-circuit établi.

On trouve qu'il faut une impédance de l'ordre de 10 ohms.

Cette impédance ne saurait être constituée par une résistance car, d'une part la puissance à dissiper dans cette résistance, en régime établi, atteindrait 87 000 kW et, d'autre part, la tension des phases libres par rapport au sol dépasserait la tension composée au moins à l'établissement du court-circuit. Une valeur inférieure de cette résistance augmenterait encore la puissance absorbée, tandis qu'une valeur notablement supérieure ferait tomber la puissance réactive résiduelle à une valeur trop faible pour que soit assuré le bon fonctionnement des relais, et laisserait les phases libres à une tension par rapport au sol au moins égale à la tension composée.

Une *réactance* de 10 ohms au contraire conduira au mode de fonctionnement suivant :

Courant de court-circuit établi maximum 2 800 A.

Composante synchrone des tensions résiduelles (une fois le court-circuit établi) en centièmes :

70	pour 2 groupes en parallèle,
76	pour 3 » »
80	pour 4 » »
84	pour 5 » »

Les phases libres seront portées, par rapport au sol, aux tensions suivantes rapportées à la tension normale.

	A l'instant du court-circuit	Après l'établissement du court-circuit
1 Groupe	1,18	< 1
2 » 	1,35	1,10
3 » 	1,45	1,24
4 » 	1,50 env.	1,31
5 » 	1,51	1,36

La résonance avec la capacité des câbles ne serait atteinte qu'en cas de marche séparée de l'usine sur un réseau de câbles dépassant 400 km de longueur, ce qui est fort loin des conditions de marche envisagées.

Enfin, un calcul d'avant-projet montre que cette réactance peut être

facilement constituée par une bobine de 1 m de diamètre sur 2 m de hauteur, portant environ 200 spires de conducteur convenablement divisé.

Une telle réactance est installée depuis plusieurs mois sur le point neutre du réseau à 60 000 V de l'Union d'Electricité. Elle a donné jusqu'ici toute satisfaction : en cas de court-circuit entre phase et terre, même à proximité de la Centrale, les à-coups sur le réseau sont devenus à peu près imperceptibles. Par ailleurs, un klydonographe monté en permanence aux bornes de la bobine, a bien prouvé l'absence de surtension anormale, comme nous l'escomptions. Enfin, le courant de court-circuit que laisse passer la bobine reste largement suffisant pour que soit assuré le fonctionnement correct des relais sélectifs instantanés.

INSTALLATIONS A PHASES SÉPARÉES.

La limitation des courts-circuits à la terre est ainsi un problème le plus souvent facile à résoudre. Il en faut tirer cette conclusion indirecte, mais des plus importantes, que dans l'aménagement d'installations nouvelles et de réseaux nouveaux, toutes précautions doivent être prises pour que les défauts d'isolement accidentels ne s'accompagnent que de mises à la terre, et que tout court-circuit direct entre phases soit rendu pratiquement impossible.

Cette mesure extrêmement importante à notre avis peut s'appliquer à tous les organes du réseau, hormis peut-être aux lignes aériennes.

Pour les alternateurs où le problème est sans doute délicat, on pourra choisir un enroulement ne comportant que des conducteurs d'une seule phase dans chaque encoche et dont les connexions frontales soient soigneusement cloisonnées.

Pour les transformateurs, on choisira des groupes d'éléments monophasés de préférence aux appareils triphasés.

Les tableaux seront réalisés avec une séparation complète des phases, les appareils de manœuvre de chaque phase étant, soit reliés mécaniquement suivant la méthode adoptée dans de nombreux tableaux américains soit, plus simplement, commandés simultanément par un dispositif électrique.

Les feeders souterrains et les connexions seront systématiquement réalisés soit par des câbles triphasés du type métallisé soit même, de préférence, par des câbles unipolaires.

En ce qui concerne les lignes aériennes, le problème ne peut être ré-

solu complètement : on peut seulement, dans une certaine mesure, en trouver une solution approchée en choisissant des armements convenables et en évitant les lignes doubles.

II. — COURT-CIRCUITS ENTRE PHASES.

Quelles que soient les précautions prises pour limiter les défauts d'isolement à des mises à la terre, le court-circuit entre phases restera toujours à redouter. Il pourra se produire fortuitement, par exemple, en cas de mise à la terre simultanée de deux phases.

Il est donc nécessaire, de toute manière, de prévoir la limitation de l'amplitude des courts-circuits entre phases, quelles que soient les précautions maintenues par ailleurs pour réduire au minimum utile les courants et les chutes de tension dans le cas le plus fréquent de simple mise à la terre.

Cette limitation des courants de court-circuit peut être assurée, d'une part par l'emploi d'alternateurs et de transformateurs possédant systématiquement une réactance propre de dispersion suffisamment élevée, et, d'autre part, par l'installation de bobines de self inductance en des points du réseau judicieusement choisis.

RÉACTANCE PROPRE DES ALTERNATEURS.

En ce qui concerne la réactance propre des alternateurs, il importe de distinguer séparément la réactance synchrone qui limite le courant de court-circuit permanent, et la réactance inverse dont dépend seulement le courant de court-circuit instantané.

L'augmentation de la réactance synchrone, qui conduit par ailleurs à la réalisation de machines de moindre poids et de rendement plus élevé a, comme contre-partie, la diminution de la stabilité de fonctionnement sur un réseau de grande capacité, et la possibilité plus grande d'auto-amorçages. Aussi, les machines modernes à grande réaction d'induit doivent-elles être obligatoirement munies de régulateurs automatiques d'excitation qui rendent assez illusoire le rôle de la réaction d'induit sur l'amplitude du court-circuit permanent.

La réactance inverse, ou réactance de fuites, peut être notablement accrue dans un alternateur sans entraîner obligatoirement une augmentation excessive de la réaction d'induit : ceci est obtenu d'une manière particulièrement élégante par l'utilisation d'encoches de

fuites ⁽¹⁾. On réalise ainsi, depuis plusieurs années, des turbo-alternateurs à grande vitesse, dont la valeur de courant de court-circuit instantané triphasé symétrique ne dépasse pas quatre fois celle du courant normal.

En ce qui concerne les transformateurs, la réactance de fuites peut atteindre des valeurs aussi élevées que celles que l'on peut désirer, puisqu'il dépend des distances respectives des enroulements primaires et secondaires, qu'il est plus facile d'augmenter que de diminuer.

BOBINES DE RÉACTANCE D'INTERCONNEXION.

L'augmentation de la réactance des alternateurs et des transformateurs a pour contre-partie d'accroître sensiblement les pertes d'énergie réactive dans ces appareils qui sont parcourus par le courant total du réseau alimenté, et de rendre ainsi plus onéreux, tant par leur prix de revient que par leur consommation propre, les organes de réglage de la tension.

Par ailleurs, si un grand nombre de ces appareils de forte réactance propre sont reliés directement en parallèle, le réseau peut encore subir des courants de court-circuit d'amplitude inadmissible.

C'est alors que s'impose l'utilisation de bobines de réactances branchées dans les connexions qui relient en parallèle les sources de courant. Ces réactances trouvent leur place, soit en série avec les lignes d'interconnexion de puissantes centrales, soit même entre les sections des barres omnibus de chaque centrale ou entre les différents transformateurs d'une même sous-station.

Ainsi placées, ces réactances permettent des échanges de puissance réelle entre centrales ou entre groupes, en produisant seulement une différence de phase entre les tensions de ces groupes; elles rendent seulement malaisé l'échange de puissance réactive entre ces groupes.

Envisageons à titre d'exemple, le cas de trois centrales ABC (fig. 1), de 375 000 kVA chacune, débitant en parallèle sur un même réseau à 60 000 V, les impédances de chacune de ces centrales, ayant les valeurs indiquées au paragraphe précédent.

Supposons, tout d'abord, ces trois centrales reliées par des lignes d'interconnexion d'impédance négligeable : si un court-circuit se pro-

(1) Quelques considérations sur le dimensionnement et le fonctionnement des turbo-alternateurs débitant sur des lignes à grande capacité. E. ROTH. Conférence Internationale des Grands Réseaux à haute tension, 1925.

duit en M entre deux phases, le courant de court-circuit instantané atteindra 35 000 A et le courant, de court-circuit permanent 18 300 A ⁽¹⁾; d'autre part, la composante synchrone des tensions résiduelles aux bornes des trois centrales tombera à 50 pour cent de la valeur normale à l'établissement du court-circuit, et à 26 pour cent de cette valeur normale, une fois le court-circuit établi.

Supposons maintenant que les centrales ABC soient interconnectées

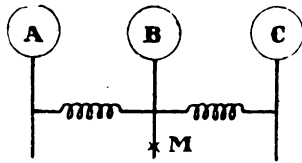


FIG. 1.

Schéma de trois centres de production ABC interconnectés par l'intermédiaire de bobines de réactance.

par des feeders capables d'assurer un échange de puissance de 60 000 kVA, ces feeders comportent chacun une bobine de réactance de 10 pour cent. Dans ce cas, le courant de court-circuit instantané en M sera de 19 000 A, et le courant de court-circuit permanent de 12 000 A; d'autre part, la composante synchrone des tensions résiduelles conservera les valeurs suivantes :

aux bornes	{	à l'établissement du court-circuit .	50 pour 100
de la Centrale B		une fois le court circuit établi. . .	34 »
aux bornes	{	à l'établissement du court-circuit .	85 pour 100
des Centrales A et C		une fois le court circuit établi. . .	60 »

Les bobines de réactance installées sur les liaisons auront donc diminué le courant de court-circuit total, et amorti considérablement l'à-coup ressenti par les réseaux alimentés directement par les centrales A et B.

(1) Rappelons que, si z_d et z_i sont respectivement les impédances synchrone et inverse du réseau, U la tension normale étoilée.

1° le courant de court-circuit entre deux phases est : $\frac{U\sqrt{3}}{z_d + z_i}$;

2° la composante synchrone des tensions résiduelles à l'endroit du court-circuit est : $U_d = \frac{U z_i}{z_i + z_d}$;

3° la tension composée aux bornes de l'interrupteur, au moment de l'ouverture, est : $U\sqrt{3} \frac{2z_i}{z_i + z_d}$.

En régime normal, la chute de tension à pleine charge dans ces réactances d'interconnexion sera nulle, pour peu que la puissance traversante soit absorbée sous un facteur de puissance voisin de 0,997 (avant); elle serait de 1 pour cent environ si la puissance était absorbée avec $\cos \varphi = 1$.

La présence de ces réactances a pour seul inconvénient d'empêcher le bouclage des lignes issues respectivement de chacune des centrales. à moins que ces lignes ne présentent elles-mêmes une impédance de valeur élevée.

BOBINES DE RÉACTANCE DE FEEDERS.

Il peut arriver que ces réactances d'interconnexion soient encore insuffisantes pour limiter à une valeur acceptable le courant de court-circuit dans un des feeders de distribution; ceci se présente par exemple dans le cas d'une ligne de petite section alimentant une sous-station de faible importance, et raccordée au voisinage d'une station de grande puissance. Il est alors nécessaire d'insérer directement au départ de ce feeder des bobines de réactance.

Considérons, par exemple, un câble de 50 mm de section, alimenté sous 10 000 V par un transformateur de 30 000 kVA, ayant une réactance propre de 8 pour cent; supposons, en outre, que la puissance des centrales alimentant ce transformateur soit telle que la réactance de ces centrales soit négligeable devant celle du transformateur. En cas de court-circuit sur le feeder considéré, près du transformateur, le courant de court-circuit atteindrait 18 750 A, en l'absence de tout organe de protection. Si ce courant ne se trouvait pas coupé en moins de 1 dixième de seconde, le câble serait irrémédiablement détruit par échauffement exagéré (1). Mais si l'on place en série, au départ de ce feeder, une réactance de 3 pour cent, le courant de court-circuit ne dépassera jamais 33 fois le courant normal, soit 3 300 A, quelle que soit la puissance de la source : ce courant, facile à couper au moyen d'un disjoncteur de dimension modeste, pourrait d'ailleurs subsister pendant plus de 3 secondes, sans échauffement particulièrement dangereux du câble.

L'usage des réactances en série avec les lignes complique évidemment le problème du réglage de la tension, et nécessite le plus souvent l'emploi de régulateurs d'induction; au point de vue qui nous occupe, ces régulateurs ont d'ailleurs l'avantage de limiter par eux-

(1) MASSON. *L'Industrie Electrique*, 10 octobre 1928, p. 437.

mêmes l'amplitude des courants de court-circuit qui peuvent les traverser, grâce à leur propre réactance de dispersion.

Il est fait aux Etats-Unis, dans les grands centres de distribution urbains, où se trouvent fréquemment interconnectées des puissances dépassant le million de kVA, un très large emploi simultanément de réactances et de régulateurs de feeders.

RÉALISATION MATÉRIELLE DES BOBINES DE RÉACTANCE.

Pour des tensions de service allant jusqu'à 15 000 V, la réalisation matérielle des bobines de réactance n'offre pas de difficulté spéciale; des précautions doivent être prises de manière à ce que d'une part elles puissent résister aux efforts électrodynamiques considérables dont elles peuvent être le siège, et que, d'autre part, les pertes supplémentaires dues aux courants parasites induits soient aussi réduites que possible. Ces bobines sont fréquemment construites avec une armature en béton, et toujours placées à l'air libre.

Lorsque la tension de service est élevée (20 000 V ou davantage), les isolements entre spires et à la masse deviennent difficiles à réaliser, et il est nécessaire de placer les bobines dans l'huile. Des artifices doivent alors être utilisés pour que la cuve métallique ne constitue pas un circuit fermé traversé par le flux de la bobine, ce qui aurait pour effet de diminuer la réactance effective de cette bobine et d'augmenter les pertes. Un de ces artifices indiqué par la Compagnie Westinghouse dans une récente publication (1) consiste à disposer, entre la surface extérieure de la bobine et la cuve, un circuit magnétique en fer, qui a pour but de fournir au flux magnétique un circuit de retour de grande perméabilité à l'intérieur même de la cuve. Un autre artifice (General Electric Co) consiste à placer entre l'enroulement et la cuve un écran de flux constitué par un second enroulement fermé en court-circuit sur lui-même; ce second enroulement est généralement constitué par le serpentín de réfrigération. Il existe de telles réactances construites pour une tension de service de 110 000 V (Centrale de Détroit).

III. — DÉSEXCITATION DES ALTERNATEURS ET RÉGULATEURS D'INTENSITÉ.

Un autre moyen de parvenir à réduire les courants de court-circuit, est d'agir sur l'excitation des alternateurs et des moteurs synchrones

(1) *The Electric Journal*, janvier 1929.

par des dispositifs automatiques, qui entrent en action dès que le débit de ces machines synchrones dépasse une valeur maximum fixée à l'avance, et qui tendent à régler l'intensité aux environs de ce maximum.

Bien entendu, ces dispositifs ne sauraient diminuer l'amplitude du court-circuit initial qui ne dépend que des réactances de fuites, mais seulement celle du court-circuit permanent; si par exemple I_1 est la valeur du courant de court-circuit en fonction du temps en l'absence de tout système de réglage automatique (fig. 2) cette valeur devient I_2 sous l'action d'un régulateur limiteur d'intensité. Si donc le court-circuit est de nature grave et si, pour des raisons voulues ou forfuites,

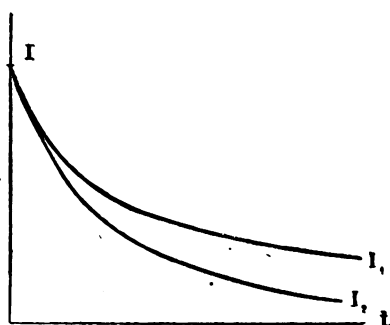


FIG. 2.

Influence d'un régulateur d'intensité sur le courant de court-circuit I débité par un alternateur, en fonction du temps t .

il n'a pas été coupé dès les premiers dixièmes de seconde, l'intervention du régulateur-limiteur aura pour effet de réduire sensiblement les échauffements développés par la surintensité.

Les régulateurs limiteurs d'intensité, dont l'utilité est déjà contestable dès que l'on utilise des interrupteurs à action rapide, ont pour grave inconvénient d'abaisser le flux des alternateurs en cas de court-circuit, et de faciliter la rupture du synchronisme des machines interconnectées. L'emploi de ces appareils vient donc à l'encontre de la technique moderne, invariablement appliquée actuellement dans tous les grands réseaux interconnectés des Etats-Unis, qui consiste à munir les alternateurs et les compensateurs synchrones de régulateurs de tension agissant sur des dispositifs d'excitation à réponse rapide, de manière à maintenir le flux des alternateurs au moins à sa valeur primitive au moment d'un court-circuit; ceci conduit évidemment à l'emploi d'interrupteurs capables de couper un courant au moins égal au courant d'établissement, quitte à limiter ce dernier à des valeurs acceptables par le développement des dispositifs précédemment décrits.

L'ÉVOLUTION DES PROCÉDÉS DE FOURNITURE DE COURANT DANS LES CENTRAUX TÉLÉPHONIQUES (1)

par M. B. SALOMON,
Ingénieur des Télégraphes.

Ordre de grandeur de l'énergie nécessitée par les Centraux téléphoniques. — A. Téléphonie manuelle : a) deux batteries non en tampon ; b) deux batteries en tampon ; c) une seule batterie en tampon ; conclusions sur la marche en tampon ; d) marche en direct avec génératrice sans self inductance ni batterie ; cas de panne du secteur. — B. Téléphonie automatique : a) puissances à fournir ; b) conditions à réaliser ; c) équipement du Central Carnot ; batteries. — C. Equipement du Central Gobelins. — D. Alimentations de secours. — E. Génératrices téléphoniques. — F. Service des bureaux manuels pendant la transformation en automatique. — Renseignements statistiques. — Intérêt économique de la marche en direct.

Le grand public et même les Ingénieurs qui ne sont pas spécialisés en téléphonie seraient bien étonnés d'apprendre que l'alimentation en énergie des grands centraux téléphoniques manuels nécessite des puissances supérieures à plusieurs dizaines de chevaux.

La puissance installée au Central téléphonique manuel Gutenberg-Central-Louvre (25 000 abonnés) pour la partie purement manuelle est supérieure à 150 ch : quatre groupes convertisseurs de 20 kW chacun, deux groupes électrogènes de secours de 30 ch, quatre groupes d'appel, etc...

— En téléphonie automatique (nous ne parlerons que du système *Rotary* de la *Western Electric C°*), les puissances sont encore bien plus considérables : les puissances installées dans les bâtiments téléphoniques de Paris sont de l'ordre de plusieurs centaines de chevaux.

— La cabine à haute tension de la rue des Archives, qui alimente actuellement l'Interurbain, la station de Paris des grands câbles souterrains et le central « Archives » et qui alimentera, dans l'avenir, outre un Interurbain considérablement agrandi et transformé, un nombre de trente ou quarante mille lignes automatiques, soit les installations contenues dans trois grands bâtiments contigus (y compris

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre le vendredi 25 octobre.

l'éclairage, les fers à souder, les ascenseurs, etc.) est capable de recevoir 1 000 kVA.

Il peut sembler paradoxal que la production de courants aussi faibles que ceux du téléphone puisse demander de pareilles puissances : cela s'explique par l'extrême multiplicité des circuits et des organes.

Nous ne parlerons que des centraux téléphoniques parisiens.

A. — TÉLÉPHONIE MANUELLE.

En téléphonie manuelle, le courant était et est encore fourni sous

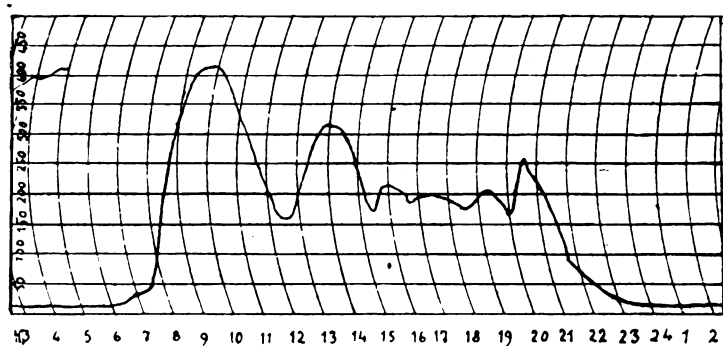


Fig. 1. — Diagramme de l'énergie consommée Passy-Kléber : Lundi.

la tension de 24 V, avec pôle positif à la terre (sauf au central « Passy » où le pôle négatif est à la terre).

Nous parlerons plus loin du central « Littré », (ouvert en 1924 sous le nom de « Fleurus ») où, par une exception unique, l'alimentation se fait sous 48 V.

L'intensité fournie dans une journée est représentée par les dia-

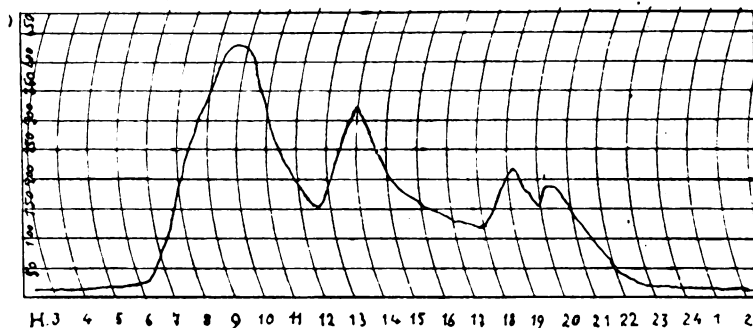


Fig. 2. — Diagramme de l'énergie consommée Passy-Kléber : Samedi.

grammes des fig. 1, 2 et 3, respectivement relatifs à un jour ouvrable ordinaire, au samedi et au dimanche.

En moyenne, l'intensité maxima de 10 heures est aujourd'hui voisine de 550 A pour un multiple « Thomson » ou un multiple « Matériel téléphonique » de 10 000 lignes (400 A pour un multiple « Ericsson »).

L'expérience prouve que le débit journalier en ampères-heures s'obtient sensiblement en multipliant par sept l'intensité de pointe, ex-

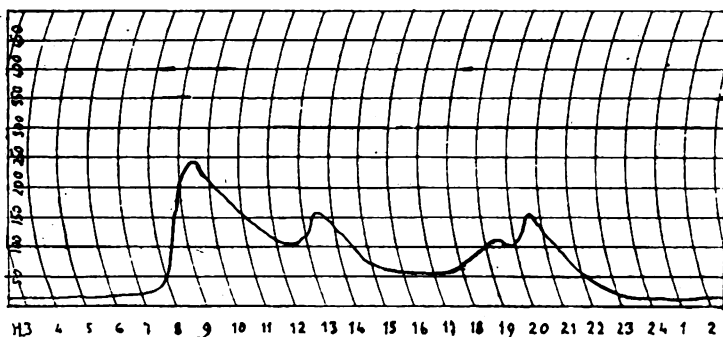


Fig. 3. — Diagramme de l'énergie consommée Passy-Kléber : Dimanche.

primée en ampères — ce qui donne, dans les deux premiers cas, qui sont les plus nombreux à Paris, 3 850 Ah, soit, en gros : 4 000 Ah.

a) *Utilisation de deux batteries, sans marche en tampon.*

La solution ancienne consistait à utiliser deux « batteries centrales » appelées dans le langage courant « grosses batteries » d'une capacité de l'ordre de 3 000 Ah. L'une d'elles était en décharge sur le multiple pendant que l'autre était chargée par le groupe convertisseur (souvent unique) ou était au repos, et l'on alternait naturellement les rôles.

Cette solution, acceptable autrefois, quand le débit de pointe n'atteignait pas encore les valeurs indiquées ci-dessus et n'excédait guère 350 A, devint inadmissible quand le débit de pointe dépassa ce chiffre.

De plus, cette solution est défavorable au point de vue de la constance de la tension d'alimentation : il est nécessaire, pour le bon fonctionnement des relais, que la tension d'alimentation, à l'arrivée au multiple, reste très voisine de 24 V. Les différentes variétés de relais ne sont pas également exigeantes à ce point de vue; mais, en général, la variation souhaitable (en téléphonie manuelle) n'excède pas 2 V, la variation tolérable 3 V. Il est évident qu'à l'heure chargée, des chutes de tension exagérées étaient à craindre dans ce système d'alimentation.

Au point de vue du rendement, la solution était aussi défavorable,

car l'énergie fournie au multiple se dégradait non seulement dans le groupe convertisseur, mais aussi dans la batterie.

Si l'on admet un rendement global moyen de 0,70 pour le groupe convertisseur et un rendement moyen en énergie de 0,70 pour la batterie, le rendement global total est de 0,49.

Le rendement de 0,70 pour une batterie est pratiquement optimiste : il suppose que la batterie est parfaitement conduite, et, en particulier, qu'elle n'est jamais « surchargée » en fin de charge, ou, plus exactement, qu'on se borne à donner des surcharges d'une heure ou deux, une fois par quinzaine ou une fois par mois. Au cas contraire, on fait à chaque fin de charge de l'électrolyse, et le rendement peut tomber à des valeurs dérisoires. (En outre, on précipite au fond des bacs la matière active des plaques et l'on amène rapidement la batterie vers sa mort).

Le rendement de 0,49, ne tient naturellement pas compte d'autres pertes, telles que celles dans la cabine de transformation, dans les diverses canalisations, dans les tableaux.

b) Utilisation de deux batteries avec marche en tampon.

On fut donc conduit à la marche en tampon aux heures chargées, ou même à toutes les heures autres que les heures très creuses.

La tension de la génératrice est constamment réglée de façon que celle-ci donne autant que possible le débit total. Aux heures de pointe seulement, une petite partie du débit est demandée à la batterie.

Soit, par exemple, un multiple absorbant 700 A à l'heure de pointé.

Pendant huit heures de nuit, la batterie débite seule. (Le débit peut être alors d'une cinquantaine d'ampères).

Dans les seize heures restantes, on marchera en tampon : pendant douze de ces seize heures, le groupe convertisseur, calculé pour 500 A, fournit la totalité du courant. Pendant les quatre heures qui restent, la batterie donne l'appoint.

Ce système présente évidemment les avantages suivants :

1° Il permet l'emploi de groupes convertisseurs calculés pour une puissance notablement inférieure à la puissance de pointe.

2° Il permet celui de batteries calculées pour une capacité largement inférieure à celle qui serait nécessaire, si elles devaient débiter seules.

(Dans la solution a) on pourrait songer à mettre les deux batteries en

parallèle, à l'heure de pointe, mais cette solution est peu favorable en pratique.)

3° Le rendement en énergie est considérablement amélioré : en effet, la majeure partie de l'énergie fournie au multiple provient directement de la génératrice sans se dégrader dans les batteries.

En ce qui concerne la constance de la tension d'alimentation, à l'arrivée au multiple, il y a progrès par rapport à la solution a) on peut en effet, aux heures de pointe, agir, dans une certaine mesure, sur l'excitation de la génératrice pour relever la tension au départ et compenser ainsi la chute de tension en ligne.

Mais on est très limité dans cette voie : en effet, si l'on augmente sensiblement la tension de la génératrice, on la pousse à fournir la totalité du débit, ce qui, aux heures de pointe, excède ses forces, et, en allant encore un peu plus loin, on la fera débiter à la fois sur le multiple et sur la batterie; mais le disjoncteur aura sauté auparavant.

En définitive, si l'on se place au point de vue de la constance de la tension d'alimentation, la marche en tampon ne constitue qu'un progrès léger.

Pour ce qui est de la conservation des batteries, il est évident qu'elles travaillent moins, et il peut y avoir aussi, à ce point de vue, un progrès. Cependant, il n'est pas évident que la marche en tampon soit, en elle-même, une condition très favorable à la vie des batteries, au moins dans le domaine de l'exploitation téléphonique, et, comme nous le dirons plus loin, nous croyons avoir observé le contraire.

Cependant, pour la marche en tampon, les génératrices ne doivent pas causer de bruit nuisible aux conversations; autrement dit, le courant qu'elles débitent doit être suffisamment exempt d'harmoniques audibles.

Les génératrices construites aujourd'hui réalisent parfaitement ces conditions, comme on le verra plus loin, mais, il n'en était pas tout à fait de même, il y a une vingtaine d'années, sauf exceptions : (une génératrice Thomson-Houston, vraiment silencieuse, datant de cette époque est encore en service).

On était obligé de mettre en série sur le circuit du multiple des bobines de self inductance comportant généralement une soixantaine de spires pour un diamètre moyen de 40 ou 50 cm, qui grevaient le prix de l'installation et causaient des chutes de tension appréciables.

La marche en tampon devenait alors acceptable, parce que les courants de fréquence nuisible se fermaient à travers la batterie, mais la marche sans batterie n'eût guère été tolérable, sauf peut-être aux

heures très peu chargées, car l'expérience prouve qu'aux faibles régimes, les harmoniques nuisibles sont généralement peu entendus. La self inductance était mise hors circuit, quand la batterie débitait seule sur le multiple.

c) *Utilisation d'une seule batterie et de la marche en tampon.*

Il était naturel de chercher à réduire les frais de première installation (achat de batteries, travaux de bâtiments, canalisations, organes de tableaux) en se contentant d'une seule batterie centrale.

Cette batterie serait toujours en débit sur le multiple et, en dehors des heures creuses, elle serait batterie-tampon.

Dans cette solution, la sécurité du bureau peut paraître un peu diminuée, en raison des réparations éventuelles à faire sur la batterie. Pratiquement, ces réparations peuvent se faire en service, sans trop de gêne.

D'ailleurs, la marche « en direct » de la génératrice pourrait se faire sans gêner les conversations, si la génératrice est suffisamment parfaite.

Mais il faut arriver à recharger la batterie tout en maintenant sur le multiple la tension voulue. Deux solutions ont été proposées :

La première consiste à utiliser des éléments de réduction : pendant la charge de la batterie, on connecte le multiple, non pas aux deux extrémités de la batterie, mais en une extrémité et en un point intermédiaire tel que la tension des éléments laissés sur le multiple soit égale à 24 volts, ou à 24 volts augmentés de la chute de tension en ligne.

A mesure que la charge avance, on enlève des éléments.

Bien entendu, ces opérations se font en dehors des heures chargées.

Si la tension de fin de charge est de 32 volts, il faut enlever :

$$\frac{32 - 24}{2,7} = \frac{8}{2,7} = 3 \text{ éléments, en fin de charge.}$$

A notre connaissance, cette solution n'a jamais été utilisée à Paris, tout au moins dans son intégralité.

On a parfois reproché à cette méthode d'être défavorable à la bonne conservation des batteries, parce que les différents éléments de la batterie ne travaillent pas de la même manière.

On a parfois préconisé l'emploi d'éléments de force contre-électromotrice, appelés aussi « cellules de polarisation. »

Ces éléments, qui présentent extérieurement le même aspect que les bacs d'accumulateurs sont constitués par des plaques de plomb bai-

gnées dans un électrolyte. Pratiquement, on emploie l'acide sulfurique étendu, et la force contre-électromotrice est de 2 V, quel que soit le courant qui passe.

Les éléments sont intercalés sur le circuit de décharge et la tension appliquée au multiple est diminuée *d'autant de fois deux volts* que l'on intercale d'éléments.

Après la charge, la tension ne revient pas instantanément à 24 V, les cellules ne sont mises hors circuit qu'au fur et à mesure de la baisse de tension.

Les cellules se comportent en somme comme des résistances, avec cette seule différence que la chute de tension qu'elles provoquent est constante et ne dépend pas de l'intensité qui passe. Peut-être peut-on considérer cette propriété comme une commodité?

Mais le résultat énergétique n'est pas meilleur que si l'on intercalait purement et simplement des résistances, qui pourraient être, par exemple, des résistances liquides.

Supposons qu'on applique cette méthode à un central automatique fonctionnant sous 48 V : à un certain moment, on intercale six éléments. Supposons que le multiple reçoive alors 800 A; la puissance perdue (en énergie chimique) est alors en kW : $12 \times 800 = 9,6$ kW. C'est beaucoup.

Evidemment, on s'efforcera de faire la charge en dehors des heures chargées : on pourrait la faire de nuit; mais alors il faudra payer des heures de nuit au personnel chargé de la surveillance.

En définitive, l'utilisation des cellules de polarisation est défavorable en elle-même, au point de vue énergétique.

En ce qui concerne les frais de premier établissement, on ajoute au prix de la batterie celui des cellules : le prix d'un élément de polarisation est à peu près les 6/10 de celui d'un élément d'accumulateur correspondant à la même intensité.

Le prix de l'appareillage et des connexions, sensiblement le même pour des éléments de réduction que pour des cellules de polarisation, est assez élevé, car il comprend celui de nombreuses canalisations qui peuvent être assez longues, et celui d'un réducteur qui est à peu près le même dans les deux cas.

Les partisans des cellules de polarisation font valoir que la batterie se trouve dans de meilleures conditions.

Pratiquement, les deux systèmes se valent à peu près et ne sont excellents ni l'un ni l'autre : ils fournissent tous deux des solutions approximatives, assez peu favorables à la conservation des batteries et

demandant une surveillance très attentive, si l'on veut maintenir à peu près constante la tension d'alimentation du multiple (qui variera, d'ailleurs, par bonds de 2 V).

Au point de vue énergétique, la solution « par éléments de réduction » est la meilleure. A Paris, les cellules de polarisation ont été expérimentées une seule fois et pendant peu de temps, en 1925, au central téléphonique « Littré » (alors « Fleurus »).

Conclusions sur la marche en tampon.

Actuellement, à Paris, la règle est d'installer deux grosses batteries identiques par multiple manuel.

Dans la plupart des bureaux manuels, la marche en tampon est maintenue constamment, sauf la nuit. (En principe de 7 heures à 19 heures).

Cette solution assure plus de sécurité et met les batteries dans de meilleures conditions de conservation que la solution « à une seule batterie ». Au central « Littré » qui est alimenté sous 48 V, et où, par suite de son appareillage automatique, une tension d'alimentation sensiblement invariable est nécessaire, la règle pour le jour est *la marche en tampon avec régulateur de tension sur la génératrice*.

Ce régulateur est du système Brown-Boveri fourni par la Compagnie Electro-Mécanique.

La tension à l'arrivée au multiple, est maintenue constante à ± 1 pour cent près (soit à 1/2 V près).

Dans ce régime, la batterie et la génératrice restent sensiblement en équilibre; la batterie n'absorbe rien et elle ne débite pas, au moins sensiblement, une fois cet équilibre établi. (Il est probable que le multiple « Littré » sera équipé dans quelque temps comme un central automatique).

d) Marche en « direct » sur le multiple avec génératrice sans self-inductance et sans batterie.

Depuis 1925, la Direction des Services téléphoniques de Paris a mis en service, au Central Trudaine (rue du Faubourg Poissonnière), la marche en direct sans self-inductance ni batterie à toutes les heures autres que les heures creuses. Aux heures creuses, une batterie débite seule sur le multiple.

Le groupe convertisseur ⁽¹⁾, comprend un moteur asynchrone 220 V diphasés, attelé directement à une génératrice 24-36 V, parfaitement silencieuse à tous les régimes, quand elle débite seule sur le multiple.

Pendant la marche en direct, la tension d'alimentation à l'arrivée au multiple est maintenue égale à $24 \text{ V} \pm \frac{1}{4}$ volt par un régulateur Brown-Boveri (petit modèle) agissant constamment sur l'excitation de la génératrice.

La pratique a consacré les avantages de ce système, qui sont évidents :

1° — Au point de vue du rendement, la totalité de l'énergie (en dehors des heures creuses) va directement du groupe convertisseur au multiple, sans se dégrader dans la batterie.

2° — La tension à l'arrivée au multiple demeure presque rigoureusement constante, sans aucune intervention du personnel préposé aux machines.

3° — Les batteries travaillent très peu et s'usent par conséquent très peu.

On les charge, en dehors de toute connexion au multiple, à une heure qui peut être quelconque; on est donc dans les meilleures conditions. On peut n'avoir *qu'une seule batterie*, en conservant tous ces avantages et sans souffrir d'aucun des inconvénients signalés plus haut.

Le prix du régulateur de tension est d'ailleurs bien inférieur à celui des accessoires et canalisations nécessités dans le système des éléments de réduction ou dans celui des cellules de polarisation, qui, d'ailleurs ne permettent un réglage que par bonds de 2 V et qui ne sont pas automatiques par eux-mêmes. (Ils peuvent le devenir, mais alors on complique encore l'installation.)

La Direction des Services téléphoniques de Paris prépare l'installation de régulateurs de tension dans la plupart de ses bureaux manuels.

Cas de panne de secteur.

En ce cas, aucune difficulté ne se présente dans les systèmes d'alimentation comportant constamment une batterie sur la multiple.

(1) Il y a trois groupes convertisseurs, dont deux susceptibles de marcher « en direct ».

Si toutefois la panne survient à une heure de pointe, il peut arriver que l'on soit obligé de mettre en parallèle deux batteries.

Dans le cas de la marche en direct, le personnel doit immédiatement connecter la batterie (ou les batteries).

Il peut donc y avoir un certain intervalle de temps (quelques minutes), pendant lequel le multiple est privé d'alimentation.

Cet inconvénient est acceptable en téléphonie manuelle. Il ne l'est pas en téléphonie automatique, en dehors des heures très creuses.

Nous allons voir comment la Direction des Services téléphoniques de Paris a résolu le problème dans le cas des centraux automatiques.

Le central « Littre » qui est soumis à certaines des sujétions de la téléphonie automatique a été, on l'a vu, traité d'une manière spéciale : marche en tampon avec régulateur de tension.

B. — TÉLÉPHONIE AUTOMATIQUE.

a) Puissances à fournir.

L'unité de bureau automatique est, à Paris, en principe, le bureau de 10 000 lignes.

Les bâtiments nouveaux sont construits pour 20 000 ou 30 000 lignes, quelquefois 40 000 et plus.

Pour un bureau de 10 000 lignes, les conditions d'alimentation et de puissances sont les suivantes :

1° *Alimentation sous 48 V continu* (1).

Consommation journalière prévue..... 7 000 Ah

Intensité de pointe prévue..... 1 060 A

2° *Alimentation des moteurs dits « de bâtis ».*

(Moteurs asynchrones sous 220 V diphasés, 50 périodes par seconde).

Puissance prévue pour l'ensemble de ces moteurs : 5 kVA.

3° *Alimentation des compteurs sous 72 volts.*

4° *Alimentation des groupes générateurs d'appel.*

Il y a deux groupes dont l'un sert de secours. La puissance de chaque moteur est d'environ $\frac{1}{2}$ ch.

L'énergie est empruntée au secteur, en haute tension, avec cabine

(1) Prévisions qui peuvent sembler larges, étant donnés les débits constatés à « Carnot ». Mais on doit escompter l'accroissement de trafic que provoqueront l'augmentation du nombre d'abonnés et l'amélioration de la qualité du service par la transformation en automatique.

de transformation : 12 000 V diphasés — 220 V diphasés, et deux câbles à haute-tension

b) *Conditions à réaliser.*

1° Le courant d'alimentation — qui doit être exempt d'harmoniques audibles — doit être fourni sous une tension aussi voisine que possible de 48 V.

Les limites de 44 et 52 V seraient à la grande rigueur acceptables : pratiquement, le constructeur demande une tension comprise entre 46 et 50 V.

2° L'alimentation en courant à 48 V ne doit jamais cesser, fût-ce un

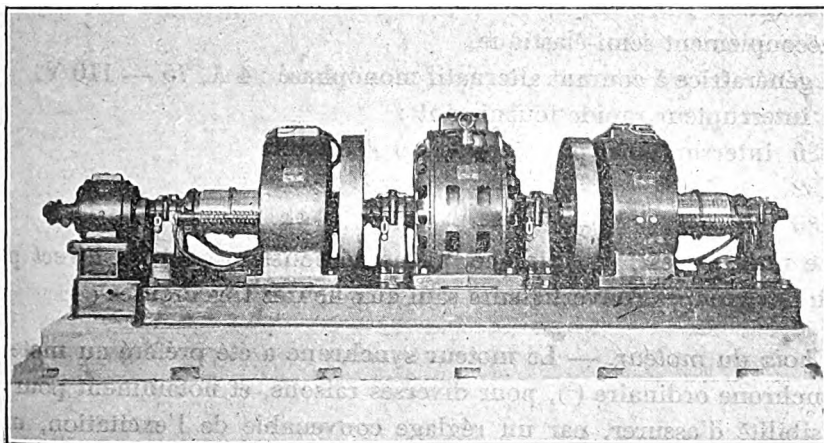


Fig. 4. — Un des groupes convertisseurs téléphoniques du central automatique « Carnot » (à gauche, près de l'excitatrice, courroie de la dynamo tachymètre). Remarquer les volants d'acier.

instant très court, sous peine d'inconvénients sérieux (au moins aux heures chargées).

3° Les moteurs d'entraînement des bâtis automatiques ne doivent jamais s'arrêter, condition cependant moins importante que la précédente.

c) *Solution adoptée à Paris pour le Central « Carnot ».*

La solution adoptée est la marche en direct avec régulateur de tension.

Le groupe des machines comprend :

Deux groupes convertisseurs Gramme comprenant chacun un moteur synchrone attelé, sur socle commun, à deux génératrices (fig. 4),

avec les caractéristiques suivantes :

Moteur diphasé synchrone : 220 V 42/50 p : s.

Excitatrice en bout d'arbre, vitesse de 840/1 000 t/mn.

Génératrices téléphoniques shunt : 580 A, 48/72 V.

Les trois machines sur arbre commun avec accouplement semi-élastique.

Socle en fonte.

Poids total : 6,5 T.

Deux groupes d'appel, fournis par le constructeur du multiple automatique (La Société « Le Matériel téléphonique ») avec les caractéristiques suivantes :

Un moteur asynchrone diphasé : 220 V 50 p : s.

puissances : 0,6 ch, 1 000 t/mn.

accouplement semi-élastique.

1 génératrice à courant alternatif monophasé : 4 A, 75 — 110 V.

1 interrupteur rapide fournissant :

380 interruptions par seconde sur 4 circuits

132 — — — — 2 —

80 — — — — 2 —

Le multiple est, en principe, alimenté constamment *en direct* par l'un des groupes convertisseurs sauf aux heures très creuses ⁽¹⁾.

Choix du moteur.

— Le moteur synchrone a été préféré au moteur asynchrone ordinaire ⁽²⁾, pour diverses raisons, et notamment pour la possibilité d'assurer, par un réglage convenable de l'excitation, une valeur très élevée du facteur de puissance.

Un phasemètre est monté sur le tableau et l'on assure constamment $\cos = 1$.

Le moteur synchrone a, d'autre part, été jugé plus avantageux que le moteur asynchrone synchronisé.

Il donne la possibilité de *l'inversion*, en cas de panne de secteur, comme on le verra plus loin.

Choix des génératrices. — Pour les génératrices, 3 solutions ont été envisagées :

1^{re} solution. — Pour chaque groupe convertisseur, une seule génératrice : 1 100 A; 48 — 72 V.

(1) Il est vraisemblable que, dans l'avenir, la marche en direct sera la règle vingt-quatre heures sur vingt-quatre.

(2) Il s'agit des groupes convertisseurs téléphoniques et non des groupes d'appel.

Inconvénients :

a) Elle conduit à des génératrices notablement plus importantes que les génératrices « téléphoniques » que construisent couramment les constructeurs français.

b) Le rendement, bon à pleine charge, devient médiocre à faible charge.

c) La solution est défavorable au point de vue de la construction en série : de telles génératrices, utilisables à Paris, ne le seraient à peu près nulle part ailleurs.

2^e solution. — On peut chercher à échelonner les puissances, de façon à marcher toujours très près de la pleine charge, pour l'un des groupes convertisseurs.

Par exemple, on aurait trois groupes convertisseurs ne comprenant chacun qu'une seule génératrice et débitant respectivement : 1 100 A; 700 A; 400 A.

ou des variantes de ce système.

Avantages : outre des avantages de rendement, un surcroît de sécurité.

Inconvénients :

a) C'est une solution chère (Machines, appareillage, etc...)

b) Elle est contraire aux principes de normalisation.

3^e solution. — On a préféré employer deux groupes convertisseurs identiques, comprenant des moteurs identiques et quatre génératrices identiques. (Deux par groupe).

La génératrice « téléphonique » de 550 A était déjà habituelle à Paris, pour la téléphonie manuelle, depuis plusieurs années, et plusieurs constructeurs la réalisaient.

En outre, ce type de génératrice est utilisable en province et en banlieue.

Le rendement n'est guère inférieur à celui que donnerait la 2^e solution et le prix d'achat est sensiblement moins élevé, l'appareillage un peu plus simple et plus homogène.

Le rendement sera toujours bon, pour cette raison que l'on marchera, suivant le débit demandé par le multiple :

soit avec les deux génératrices d'un groupe, en parallèle,

soit avec une seule des deux génératrices, l'excitation de l'autre étant coupée.

Le tableau suivant montre que, sous 48 V (cas de la marche en direct sur le multiple) le rendement, à 250 A, c'est-à-dire au-dessous du quart de charge, est encore supérieur à 60 pour cent.

Il faut descendre jusqu'aux environs du $\frac{1}{7}$ de la charge pour trouver un rendement inférieur ou égal à celui que l'on obtient en faisant débiter une batterie.

Rendements des groupes convertisseurs Gramme du Central « Carnot ».

Intensité en ampères	1000	750	500	250
η à 72 volts en centièmes	76	75,5	73	66,2
η à 48 volts en centièmes	73,2	72	70	60

Pendant la marche en direct, les génératrices qui débitent (ou la génératrice qui débite) sont soumises chacune à l'action d'un régulateur Brown-Boveri qui commande automatiquement l'excitation de chacune d'elles, de façon que la tension d'alimentation à l'arrivée au multiple soit égale à 48 V, à ± 1 pour cent près.

La tension reste ainsi comprise entre 47,5 V et 48,5 V.

Cette précision est quatre fois supérieure à celle qu'impose le constructeur, mais sans être indispensable, elle est très utile.

Quand les deux génératrices d'un même groupe convertisseur débitent en parallèle sur le multiple, elles doivent débiter également : ce résultat est obtenu grâce à une certaine connexion entre les circuits électriques des deux régulateurs, étudiée spécialement par la Société Gramme.

Si une génératrice est placée en position : « Charge de la batterie », elle est, *ipso facto*, libérée de son régulateur de tension, et placée sous l'action de son relais à retour de courant.

Au contraire, une génératrice qui passe de la batterie au multiple, tombe, *ipso facto*, sous le contrôle de son régulateur et se trouve libérée de son relais à retour de courant.

Cas de panne de secteur.

Le multiple ne doit jamais être privé de son alimentation sous 48 V, fût-ce pour un temps extrêmement court.

D'une façon précise : si le secteur vient à manquer, l'alimentation de secours doit être établie avant que la tension à l'arrivée au multiple soit tombée au-dessous de 46 V.

Deux volants en acier ont été montés sur l'arbre commun des trois machines (le moteur et les deux génératrices).

Grâce à l'adjonction de ces volants et à l'emploi de contacteurs spéciaux à action instantanée imaginés et construits par la Société Gramme :

α) La batterie est reliée au multiple avant que la tension à l'arrivée soit tombée au-dessous de 46 V.

β) Les génératrices et le moteur du groupe qui charge la batterie — s'il y en a un — sont instantanément déconnectés et ce groupe s'arrête.

γ) *Le groupe qui se trouvait alimenter le multiple au moment de la panne reste en marche.*

Les génératrices à courant continu qui débitaient sur le multiple deviennent des moteurs à courant continu actionnés par la batterie.

En même temps, son moteur synchrone devient un alternateur 220 V diphasés à 50 p : s, qui alimente les moteurs des bâtis automatiques, ceux des machines d'appel et les moteurs des services auxiliaires du groupe électrogène de secours.

C'est là *l'inversion*, dont nous avons parlé.

La vitesse du groupe est maintenue aux environs de 1 000 t : mn par les régulateurs automatiques qui cessent de marcher en régulateurs de tension et deviennent des régulateurs de vitesse : en effet, ils se trouvent désormais sous l'influence de la tension d'une dynamo-tachymètre, que le groupe entraîne par l'intermédiaire d'une courroie.

Grâce à l'ensemble de ces dispositions, les diverses alimentations ne cessent pas un instant, si court soit-il.

Batteries du central automatique « Carnot ».

Les batteries d'accumulateurs (fournies respectivement par la Société Tudor et par la Société Dinin), sont :

a) Une batterie de 8 000 Ah extensible à 10 000 Ah, (fig. 5) dont quatre éléments de réduction *pour le cas où une panne de secteur se produirait pendant la charge de la batterie.* (C'est dire que ces éléments ne travaillent pour ainsi dire jamais en éléments de réduction).

b) Deux batteries de 72 Ah extensibles à 145 Ah, 35 éléments (pour les compteurs).

C. — EQUIPEMENT DU CENTRAL AUTOMATIQUE « Gobelins ».

L'installation de « Gobelins » est établie d'après les mêmes principes que celle de « Carnot ».

Divers progrès ont cependant été réalisés et, notamment :

- 1° Un seul régulateur de tension (B B C Petit modèle) suffit pour les deux générateurs de chaque groupe convertisseur.
- 2° Les groupes convertisseurs ne sont pas dotés de dynamotachy-

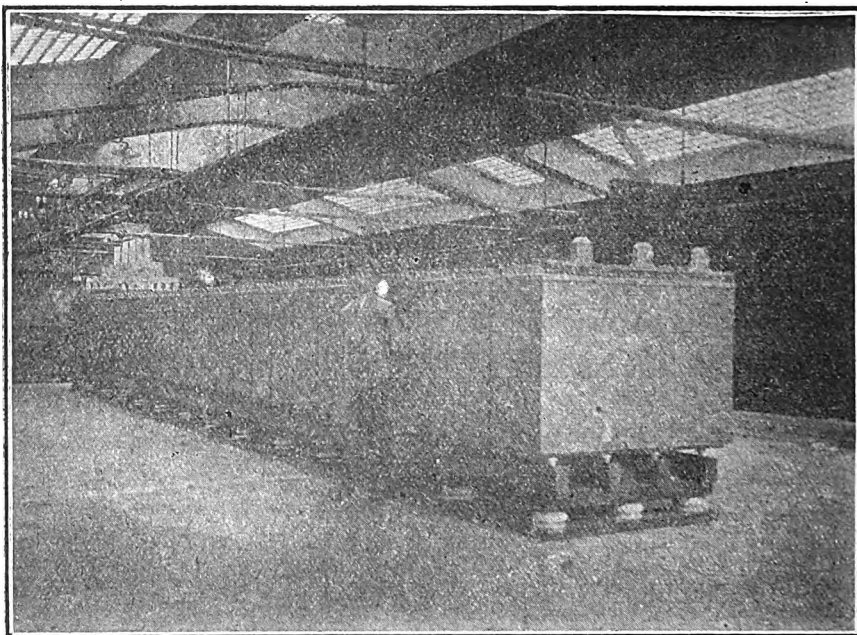


Fig. 5. — Batterie de 8.000 Ah extensibles à 10 000 Ah du central automatique « Carnot ».

mètre pour *l'inversion* : l'excitatrice du moteur synchrone en fait office.

D. — ALIMENTATION DE SECOURS.

Pour la téléphonie manuelle, on a été conduit à installer en principe : deux groupes convertisseurs et deux groupes d'appel au moins dans chaque bâtiment et à prévoir, pour les cas de panne de secteur, des groupes électrogènes de secours.

La solution la plus commune était, à ce point de vue, la suivante : Un groupe comprenant un moteur à explosion, capable de fonctionner indifféremment au gaz ou à l'essence et une génératrice (1) télépho-

(1) Téléphonique, depuis quelques années.

nique (généralement de 24 V, exceptionnellement de 48 V) capable de débiter 300 A, dans le passé, et, depuis quelques années, de 500 A au moins.

Les bureaux très importants comportaient deux groupes électrogènes de secours.

Pour l'éclairage, un groupe de type analogue, mais donnant 110 V continu.

(Puissance : une quinzaine de kilowatts, en général).

Les moteurs à explosion ont été à deux, puis à quatre cylindres. En-

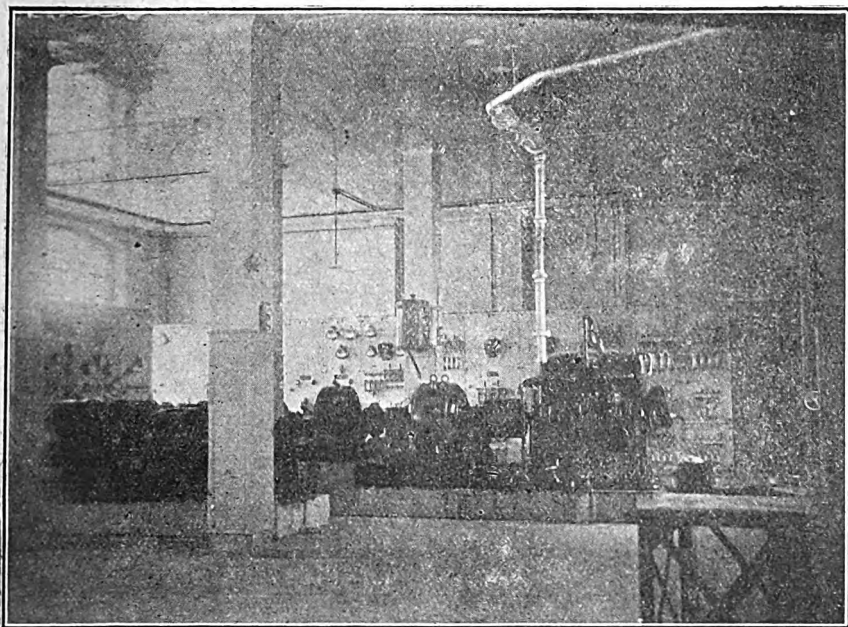


Fig. 6. — Salle des machines du Central manuel « Bolzaris » — on aperçoit l'un des deux groupes convertisseurs électriques et le groupe électrogène de secours (à moteurs à explosion 6 cylindres Renault).

fin, deux moteurs à huit cylindres en V (De Dion Bouton) et deux moteurs à six cylindres en ligne (Renault) ont été mis en service plus ou moins récemment (fig. 6).

La solution adoptée pour les sources d'énergie dans les centraux manuels les plus modernes a été la suivante :

Une cabine à haute-tension (12 000 V diphasés — 220 V diphasés), avec deux câbles à 12 000 V issus de deux sous-stations différentes de la C. P. D. E.

Une source basse-tension (généralement 3 000 V — 110 V) pour une puissance variable.

Un ou plusieurs groupes de secours comprenant des moteurs à explosion.

Au lieu de ces moteurs, on a installé, dans les *centraux automatiques*, un groupe de secours chargé de se substituer au secteur et comprenant un moteur Diesel de 300 ch environ attelé à un alternateur diphasé 220 V.

Au central « Carnot » le groupe Diesel comprend : (Fig. 7).

1 moteur, licence MAN — 6 cylindres verticaux — 4 temps, à injection mécanique.

1 alternateur diphasé 220 V (avec neutre sorti) 260 kVA.

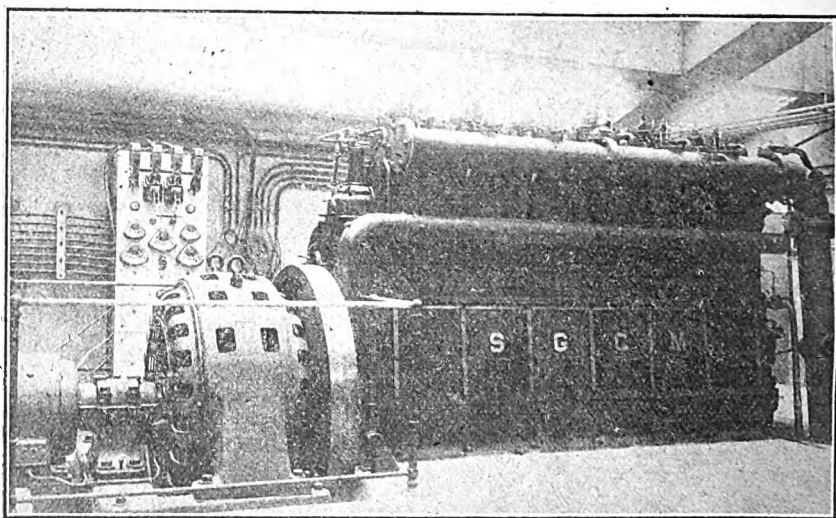


Fig. 7. — Groupe Diesel — alternateur de 300 ch.
du central automatique « Carnot ».

1 dispositif de réfrigération avec aéro-condenseur, système Fouché.

Au central « Gobelins » :

1 moteur Sulzer, 6 cylindres verticaux, 2 temps, à injection mécanique.

1 alternateur diphasé, 220 V (avec neutre sorti) à réfrigération par eau courante.

Dans beaucoup de cas, tout est prévu pour l'installation éventuelle d'un second groupe de secours analogue.

Ainsi, en cas de panne de secteur, on passe sur le second câble de la C. P. D. E.

Au cas où ce câble est hors de service, on procède à la mise en route du groupe Diesel, laquelle ne demande que quelques minutes.

En attendant, la source de basse-tension, qui ne sera que très rarement en panne en même temps et la batterie (de 10 000 Ah environ) assurent, l'une l'alimentation de l'éclairage, l'autre celle du multiple (par le système d'inversion).

On voit que les secours sont largement calculés.

Pratiquement, lors de la grande panne de la C. P. D. E. qui s'est produite, au début de 1929, et qui a affecté à peu près tout Paris, les interruptions de service dans les centraux téléphoniques ont été nulles ou insignifiantes.

Pour augmenter la sécurité de l'ensemble de ses Centraux, la Direction des Services Téléphoniques de Paris a récemment mis en service un groupe de secours monté sur remorque, comprenant un moteur Renault, six cylindres, de 80 ch et deux génératrices de 24 V, 550 A (Gramme) susceptibles de fonctionner, soit en parallèle (pour les bureaux sous 24 V, soit en série (pour les bureaux sous 48 V).

E. — LES GÉNÉRATRICES TÉLÉPHONIQUES.

Nous avons appelé « téléphoniques » les génératrices capables de débiter sur le multiple sans batterie-tampon et sans self-inductance et sans causer le moindre bruit dans les conversations, autrement dit, des machines qui ne produisent pas d'harmoniques audibles.

Les génératrices capables de marcher en tampon sans causer de bruit étaient déjà partiellement téléphoniques, et il s'est agi de les perfectionner.

Les constructeurs français ont d'abord résolu la question en utilisant des machines bobinées en anneau : certains d'entre eux — notamment la Société Gramme — sont restés fidèles à cette formule et nous ne croyons pas qu'ils songent à l'abandonner.

La Société Thomson-Houston, au contraire (devenue « Alsthom »), a construit pendant un certain nombre d'années des machines bobinées en anneau; puis elle a adopté — récemment — un type de machines bobinées en tambour.

Les machines bobinées en anneau — en particulier, les génératrices Gramme des Centraux Automatiques « Carnot » et « Gobelins » — sont établies de façon à éviter aussi complètement que possible les harmoniques de collecteur et les harmoniques de denture. Ces machines (à excitation shunt) sont bipolaires, avec pôles de commutation.

A signaler : grand nombre de lames au collecteur, grand entrefer,

encoches semi-fermées, cornes polaires obliques et taillées en biseau.

Tout cela, en somme, n'offre rien de bien nouveau.

Cependant il a fallu, en fait, d'assez longues études pour réaliser la perfection.

Il faut, pour obtenir un silence complet, des machines très largement calculées, très désaturées, d'un usinage très soigné, d'un équilibrage parfait. En particulier, les collecteurs doivent être soigneusement vérifiés, les lignes de balais très bien assujetties.

Pratiquement, les divers constructeurs n'ont pas réalisé d'emblée des machines excellentes; mais, aujourd'hui le réseau de Paris compte un grand nombre de machines de ce genre, parfaitement silencieuses.

La Société « Alsthom », dans son dernier type, bobiné en tambour, utilise les pôles supplémentaires, non seulement pour faciliter la commutation, mais aussi pour amortir les oscillations gênantes.

Le flux magnétique qui traverse un pôle supplémentaire se divise en deux parties : une première partie traverse, à la façon habituelle, l'entrefer et l'induit et facilite la commutation.

Une seconde partie se ferme à travers un circuit magnétique spécial qui évite l'induit et revient à la carcasse à travers un entrefer artificiel.

L'expérience montre qu'en réglant convenablement cet entrefer et les sections des circuits magnétiques, on peut obtenir l'étouffement des pulsations nuisibles.

Dans ces conditions, la Société « Alsthom » utilise des machines qui ne diffèrent pas essentiellement, par ailleurs, de celles de types courants.

F. — EXTENSIONS NÉCESSITÉES DANS LES BUREAUX MANUELS PENDANT LA PÉRIODE DE TRANSFORMATION EN AUTOMATIQUE.

Pendant cette période, les nécessités de la connexion entre bureaux automatiques et bureaux encore manuels, entraînent, dans onze bâtiments, des installations automatiques spéciales (Indicateurs d'appel et sélection directe).

Ces installations sont parfois importantes : ainsi, les bâtis automatiques montés au groupe « Gutenberg-Central-Louvre », occupent actuellement 400 m² et représentent un ensemble plus considérable que le Central Automatique de Nantes, et leur importance croîtra encore beaucoup.

Pour l'alimentation de ces bâtis automatiques, les ateliers d'énergie des anciens bureaux ont reçu, pour la plupart, un groupe con-

vertisseur de 35 à 40 kW, en général, et des batteries d'accumulateurs de plusieurs milliers d'ampères-heures sous 48 V.

En même temps, ces extensions amorcent la transformation des mêmes bâtiments en automatique (et à titre d'exemple, la batterie de 48 V ajoutée à « Gutenberg » est du type : 11 000 Ah).

G. — RENSEIGNEMENTS STATISTIQUES. — INTÉRÊT ÉCONOMIQUE
DE LA MARCHÉ EN DIRECT.

Pour terminer, montrons par quelques chiffres l'extension prise par les ateliers d'énergie des Centraux téléphoniques.

Jusqu'en 1925, l'installation d'énergie du groupe : « Gutenberg-Central-Louvre », qui comptait 25 000 abonnés (un cinquième du réseau de cette époque), et qui était, de beaucoup, le central le plus important, occupait :

75 m² pour la salle des machines,

115 m² pour la salle d'accumulateurs.

Il y avait, en outre, en sous-sol, un groupe électrogène de secours de 20 ch pour le 24 V et un autre de 15 ch pour l'éclairage.

En 1925, cette installation a été transférée dans deux salles qui, au total, représentent 340 m² et qui réunirent alors quatre groupes convertisseurs électriques, trois groupes électrogènes de secours et quatre groupes d'appel, une batterie de 6 000 Ah extensible à 8 000 Ah, une de 3 000 Ah extensible à 4 000 Ah, deux de 5 000 Ah et diverses petites batteries. — Une cabine à haute tension, capable de recevoir plus tard, 900 kVA, a été édifée dans une cour, en 1928 ⁽¹⁾.

Dans les bâtiments de type ancien, les ateliers d'énergie n'occupaient souvent, qu'une centaine de mètres carrés environ, au total.

Dans les bureaux automatiques, ces surfaces ont été quadruplées et au delà : au central de la rue de Navarin, par exemple, les surfaces en mètres carrés réservées au service des machines comprennent :

Cabine à haute tension	80
Salle des machines.	225
Salle d'accumulateurs	270
Salle des groupes Diesel	100
TOTAL.	675

(1) En outre, ont été installés en 1928 un groupe convertisseur nouveau et une batterie du type 11.000 Ah, 48 V.

La puissance totale des cabines à haute-tension, actuellement installées dans les centraux téléphoniques pourra être portée à 12 000 kVA.

La puissance totale des cabines à haute-tension installées en 1940, pour le téléphone sera de l'ordre de : 30 000 kVA.

La consommation annuelle d'un bureau manuel de 10 000 abonnés revient actuellement à 35 000 francs, en moyenne.

En automatique, cette consommation, pour 10 000 lignes (l'énergie étant achetée, bien entendu, en haute-tension), revient actuellement à 70 000 francs, et, dans une dizaine d'années, à supposer que le prix de l'énergie électrique, soit resté le même, elle reviendra vraisemblablement à 110 000 francs, environ, par suite de l'extension du réseau et de l'accroissement du trafic.

A ce moment, le réseau de Paris comptant 500 000 abonnés, en y comptant la banlieue immédiate, la dépense annuelle pour l'achat de l'énergie électrique sera voisine de 5 500 000 francs.

On voit ainsi l'intérêt d'un rendement aussi élevé que possible dans l'alimentation des multiples.

On peut admettre que le système de la marche en direct représente un accroissement de rendement moyen de 10 pour cent au moins, par rapport au système mixte (marche en tampon avec appoint de la batterie aux heures les plus chargées).

Ce qui ferait, en 1940, pour l'ensemble de Paris, une économie annuelle de l'ordre de 500 000 francs au moins.

Au point de vue du rendement, la marche en direct n'est pas plus avantageuse que le système de la marche en tampon, avec régulateur, mais elle présente sur ce système, en dehors des avantages techniques qu'on a vus, celui de placer les batteries dans des conditions de conservation bien supérieure, et, à ce point de vue, elle est plus économique.

Nous terminons en remerciant de sa précieuse collaboration M. ANDRIEUX, attaché à la Direction des Services Téléphoniques de Paris (service des Machines), qui a bien voulu nous aider dans la réunion de divers renseignements.

INFORMATIONS

DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Attribution pour 1929 de la Médaille Kelvin à M. André Blondel

Par lettre du 1^{er} juillet 1929, l'Institution of Civil Engineers de Londres, a notifié à la Société Française des Electriciens que dans sa séance du 21 juin, son Comité avait attribué à notre Président d'honneur, M. André BLONDEL, la 4^e médaille triennale Kelvin dont les trois premiers titulaires ont été le D^r W.-C. UNWIN, le D^r ELIHU THOMSON, et Sir Charles PARSONS.

Après avoir examiné les propositions faites par les principales Sociétés d'ingénieurs du monde entier, elle a, en effet, reconnu que M. A. BLONDEL était actuellement le plus digne de recevoir cette marque de distinction pour ses travaux et ses recherches dans les branches qui ont intéressé spécialement Lord KELVIN.

Attribution des prix Ancel et Cheux pour 1929

Le 28 mai 1929, le Comité a pris les décisions suivantes :

1° Le prix Ancel (dont le montant est de 800 francs), sera partagé entre M. MESNY, pour ses travaux sur la téléphotographie d'amateurs et M. CHAUVÉAU, pour ses travaux sur le stérographe.

2° Le prix Cheux (dont le montant est de 2 400 francs), sera attribué à M. DAUVILLIER, pour ses travaux sur *la production, l'utilisation radiologique et le dosage de rayons X de grande longueur d'onde, jusqu'à 8 unités Angström.*

Ces prix seront remis aux titulaires dans une séance ultérieure de la Société, en même temps qu'un exemplaire de la médaille à l'effigie de MASCART.

Création d'une carte spéciale pour les Membres Perpétuels de la Société

Le Bureau a décidé de remettre à partir de 1930, une carte spéciale aux Membres perpétuels de la Société.

ERRATA

A) A la communication de M. Dauzère, sur « La foudre et les lignes électriques ». (Bulletin de juin 1929.)

- 1° — page 577, lignes 30 et 31, au lieu de « plusieurs centaines de volts par mètre », *lire* : « plusieurs centaines de *mille* volts par mètre »
- 2° — page 582, ligne 13 du texte : au lieu de « causes de l'ionisation », *lire* : « étude expérimentale de l'ionisation ».
- 3° — page 584, ligne 2, au lieu de :
 « $q' = v'n'e'F$ » *lire* : $q' = k'n'eF$
ligne 4, au lieu de :
 $\lambda' = k'n'e'$ *lire* : $\lambda' = k'n'e$.
- 4° — page 587, ligne 5, au lieu de : « par une augmentation totale du nombre total » *lire* : « par une augmentation *notable* du nombre total ».
- 5° — page 594, carte des Chemins de fer du Midi, sur le coin à droite et en haut, le nom de la ville écrit « Audi » doit se *lire* « Auch ».
- 6° — Au bas de la page 597, au lieu de « Conclusions. — J'ai cherché à découvrir le mécanisme » *lire* : « Conclusions. — J'ai cherché à expliquer le mécanisme ».

B) A la communication de M. Massing, sur « L'éclairages des grandes surfaces par projecteurs ». (Bulletin de juin 1929.)

- Page 630, avant dernier paragraphe, au lieu de : « réflecteurs genre Holophane » *lire* : « réflecteurs Holophane ou autres ».

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

RAPPORTS PRÉSENTÉS A LA SEMAINE D'OCTOBRE 1929 (1) (*suite*) :

1^{re} Section. — Les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil (M. BETHENOD), p. 923.

Centrales thermiques américaines (M. MATHIVET), p. 927. — Discussion (MM. DUVAL, DARRIEUS, GENISSIEU), p. 935.

2^e Section. — Optique des surfaces diffusantes (MM. P. WAGUET et DOURGNON), p. 939.

3^e Section. — Redresseurs à anode colloïdale (M. ANDRÉ), p. 961.

5^e Section. — Protection du synchronisme sur les transmissions radiotélégraphiques Baudot-Verdan (M. Ch. BONNIN), p. 974.

Contribution à l'étude du filtrage des courants redressés (M. DEMONTVIGNIER), p. 982.

6^e Section. — De l'Universalité nécessaire du système métrique absolu (M. F. BAYLE), p. 1020.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

LES EMBRAYAGES AUTOMATIQUES APPLIQUÉS AU DÉMARRAGE DES MOTEURS A CAGE D'ÉCUREUIL⁽¹⁾

par M. J. BETHENOD.

Conditions que devrait remplir un démarrage automatique idéal. — Principes des poulies DEM à lubrifiant DEM, à blocage EGL(), JED à deux embrayages en parallèle, ALBO. L'énergie prélevée au réseau pendant la période de démarrage, est le double de la force vive emmagasinée dans les pièces tournantes à la fin du démarrage

Les avantages des moteurs d'induction à cage d'écureuil sont trop connus des électriciens, pour qu'il y ait lieu de les rappeler ici. Ils ont conduit depuis longtemps divers inventeurs à imaginer des dispositifs destinés à améliorer les conditions de démarrage de semblables moteurs, de manière à en étendre l'emploi, même pour des puissances déjà très appréciables. Le but du présent rapport est surtout de préciser l'état de la question en insistant sur quelques considérations d'ordre général qui s'appliquent à tous les modèles d'embrayages automatiques, dont certains sont d'ailleurs de conception récente. Pour la description détaillée des embrayages en question, les références indiquées dans le texte permettront au lecteur de se reporter à diverses études qui leur ont été consacrées dans les publications techniques.

De toute façon, l'emploi d'un embrayage automatique ne peut, en aucun cas, conduire à un à-coup de courant inférieur à celui obtenu à vide, lequel est accru du fait du régime transitoire qui suit la fermeture de l'interrupteur.

Si cet à-coup doit déjà être diminué, l'artifice bien connu du couplage successif en étoile et en triangle des enroulements statoriques est d'un usage nécessaire dans tous les cas. Cela admis, un embrayage automatique idéal devrait fournir un résultat équivalent à celui qu'on obtiendrait avec un embrayage à main (ou poulie folle, etc...) permettant d'abord un démarrage complètement sans charge, puis, une fois la pleine vitesse atteinte, une mise en charge progressive jusqu'à complet « accrochage » de l'embrayage, le couple ne dépassant pas, pendant toute cette mise en charge, celui correspondant au débit maximum toléré pour l'installation. On se rend compte aisément que ce programme conduit à l'établissement d'un embrayage automatique

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre, le lundi 21 octobre 1929.

agissant avec un certain retard, de façon à permettre la mise en vitesse à vide du moteur, avant d'entrer en fonctionnement.

Cette nécessité montre de suite qu'un simple embrayage à force centrifuge, tel que ceux proposés depuis plus de trente ans pour le démarrage des moteurs d'induction monophasés, ne saurait convenir, car il importe qu'une fois l'embrayage effectué le moteur puisse être soumis à une surcharge momentanée sans qu'un glissement se produise. Or, en raison de l'allure parabolique du couple résistant développé par un embrayage ordinaire à force centrifuge, en fonction de la vitesse du rotor, cette condition ne peut évidemment être remplie que si « l'accrochage » de l'embrayage s'effectue à une vitesse assez voisine (par excès) de celle qui correspond au maximum de couple du moteur et à partir de là, le démarrage se termine dans les mêmes conditions que celles qui correspondraient à un démarrage sous charge, d'où la production d'un à-coup de courant important, de durée généralement inadmissible.

D'ailleurs, le résultat n'est guère amélioré par l'adjonction de ressorts de rappel paralysant l'action de la force centrifuge *au-dessous d'une certaine vitesse*.

Cette considération a conduit les créateurs de la poulie DEM (voir G. Lebaupin, R. G. E. tome XV, 7 juin 1924, p. 1066) à l'adjonction d'un lubrifiant destiné à paralyser partiellement l'action en question *durant les premiers instants de la mise en route*; grâce à cet artifice ingénieux, le couple résistant appliqué au rotor pendant tout le démarrage peut être maintenu suffisamment inférieur au couple maximum que peut supporter l'embrayage sans paliner, une fois la couche de lubrifiant entre les surfaces frottantes chassée sous l'effet de la force centrifuge.

Récemment, un perfectionnement intéressant a été apporté à cette poulie (devenue la poulie DEM-EGLO), par l'adjonction d'une bague massive concentrique à l'axe, qui est soumise à un effet d'inertie pendant l'accélération du rotor et peut ainsi, grâce à un dispositif de blocage très simple, s'opposer au déplacement radial des sabots d'embrayage tant que le rotor augmente de vitesse (voir P. Leboucher, R. G. E., tome XXIII, 16 juin 1928, p. 1044 et 30 juin 1928, p. 1130). Il s'agit bien encore ici d'un dispositif retardateur, dont la nécessité a été établie plus haut. Une autre poulie, également de construction française (poulie JED) évite l'usage de l'huile parfois gênant, et se compose en réalité de deux embrayages à force centrifuge de construction très simple *montés en parallèle*. L'un transmet un effort sensiblement proportionnel au carré de la vitesse angulaire du moteur, tandis que

l'autre fournit un effort additionnel *proportionnel* au carré de la vitesse de la machine-outil à entraîner. On règle le couple maximum qu'est susceptible de transmettre sans paliner le premier embrayage de façon que, par exemple, il soit égal, à une vitesse très voisine du synchronisme, au couple normal du moteur.

Dans ces conditions, il est bien évident que le moteur pourra atteindre rapidement et sans à-coup excessif une vitesse elle-même très voisine de la vitesse à vide, avant même que la machine-outil ait commencé à tourner, et qu'à partir de là, la mise en vitesse de celle-ci se fera progressivement sous l'action du couple transmis par le premier embrayage ; cette action sera renforcée par celle du second embrayage au fur et à mesure que la vitesse de la machine-outil augmentera, et finalement, une fois « l'accrochage » complètement effectué, l'action *simultanée* des deux embrayages pourra être suffisante pour éviter tout patinage lorsque le moteur subit une surcharge. On conçoit d'ailleurs qu'en proportionnant convenablement ces embrayages, on peut varier à volonté les conditions de mise en vitesse (voir J. Bethenod, R. G. E., tome XXIII, 24 mars 1928, p. 541).

Un des avantages de cette solution, facilité par l'absence de tout lubrifiant, réside dans la parfaite ventilation qu'elle permet de réaliser ; il ne faut pas oublier, en effet, qu'une énergie relativement importante doit être dissipée en chaleur dans l'embrayage, *quel que soit son principe*.

Bien d'autres solutions ont encore été imaginées, notamment en Allemagne, mais leur description dépasserait le cadre de cette note, dont le but principal est de chercher à mettre en évidence les données exactes du problème. Nous citerons encore cependant la poulie ALBO (voir K. Obermoser, E. T. Z. *Heft* 15, 9 avril 1925, p. 521), qui comporte une bague de blocage, comme la poulie DEM-EGLO. Mais au lieu de compter uniquement sur la disparition de l'accélération du rotor pour opérer le déblocage des sabots d'embrayage, cette poulie utilise, pour cette opération, l'effet de freinage qui est produit à l'instant où l'on passe du couplage étoile au couplage triangle (ce freinage est probablement dû au régime transitoire pendant lequel les enroulements statoriques sont momentanément le siège d'un courant continu dont le champ freine le rotor).

En terminant cette analyse succincte, nous nous proposons d'exposer quelques considérations sur l'énergie prélevée au réseau pendant toute la période de démarrage d'un moteur d'induction pourvu d'un embrayage de type absolument quelconque.

On suppose que les pertes Joule dans le stator sont relativement faibles, ou peuvent tout au moins être assimilées à des pertes Joule dans le rotor qui ne contribueraient pas au couple ; en outre, on néglige l'effet des frottements divers, hypothèse admissible en cas de démarrage rapide, où les forces d'inertie ont une action prépondérante. En désignant donc par C le couple instantané correspondant à une puissance W absorbée par les enroulements statoriques, M_1 et M_2 les moments d'inertie respectifs du rotor et de la machine-outil entraînée (le dernier ramené, bien entendu à la vitesse du moteur), ω_1 la vitesse angulaire du rotor, ω_2 celle de la machine-outil entraînée, on peut écrire, d'après la théorie des moteurs d'induction :

$$C = \frac{\chi W}{\Omega} \quad (1)$$

Ω étant la pulsation et χ un facteur inférieur à l'unité, destiné à tenir compte de l'effet Joule dans le stator.

D'autre part, si C' est le couple transmis à chaque instant par l'embrayage, dont la loi de variation en fonction de ω_1 et de ω_2 est laissée complètement arbitraire, les relations évidentes :

$$C = M_1 \frac{d\omega_1}{dt} + C'$$

$$C' = M_2 \frac{d\omega_2}{dt},$$

combinées avec (1) donnent immédiatement l'égalité :

$$W = \frac{\Omega}{\chi} \left[M_1 \frac{d\omega_1}{dt} + M_2 \frac{d\omega_2}{dt} \right].$$

En intégrant pour la durée θ du démarrage, et en remarquant que, pour $t = 0$ on a évidemment $\omega_1 = \omega_2 = \Omega$ (frottements négligeables), on arrive ainsi aisément à l'expression suivante, qui détermine l'énergie électrique absorbée pendant toute la période du démarrage :

$$\int_0^\theta W dt = \frac{(M_1 + M_2)\Omega^2}{\chi}. \quad (2)$$

En négligeant les pertes Joule du stator ($\chi = 1$), l'énergie en question est donc exactement le double de la force vive emmagasinée dans les pièces tournantes à la fin du démarrage. La somme des pertes Joule dans le rotor et des pertes par friction dans l'embrayage est ainsi elle-même égale à cette force vive, et on ne peut diminuer les premières qu'en augmentant les secondes, et vice-versa. Cette loi très simple, valable quelle que soit la nature de l'embrayage, paraît intéressante à signaler ; bien entendu, elle ne permet de préjuger en rien les qualités propres de chaque système d'embrayage, en ce qui concerne notamment la *pointe* atteinte par le courant absorbé.

RÉSUMÉ DE LA CONFÉRENCE DE M. MATHIVET SUR LES CENTRALES THERMIQUES AMÉRICAINES ⁽¹⁾

Les Compagnies houillères du Nord et du Pas-de-Calais, ayant maintenant terminé complètement leur reconstitution et équipé la dizaine de Centrales Electriques qui assurent leur vie quotidienne, il a paru intéressant à M. MATHIVET de rechercher ce que les Américains avaient fait de nouveau depuis 10 ans, en matière de stations centrales et de voir dans quelles mesures leurs travaux pouvaient s'appliquer au développement futur des réseaux à haute-tension dans la Région du Nord de la France.

Huit Centrales Thermiques Américaines ont été étudiées, savoir :

1° Trenton Channel (Détroit).	300 000 kW
2° Crawford-Avenue (Chicago)	350 000 »
3° Richmond (Philadelphie).	600 000 »
4° Philo (Ohio)	250 000 »
5° Hell-Gate (New-York)	450 000 »
6° East River (New-York)	1 000 000 »
7° Edgar-Station (Boston, Centrale à 84 kg.).	150 000 »
8° State-Line (Chicago).	1 000 000 »

Après avoir projeté les vues ou schémas concernant ces huit stations centrales, et avoir montré au cours des projections les différences essentielles existantes entre chacune d'elles, le conférencier résuma dans le tableau ci-après les caractéristiques des stations étudiées et fit les remarques générales suivantes :

1° *Surface de chauffe.* — Les Ingénieurs américains construisent de plus en plus fréquemment des chaudières de 2 000, 2 500 et même 3 000 m², capables de produire jusqu'à 250 000 kg de vapeur à l'heure.

2° *Mode de chauffage.* — Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les Ingénieurs américains ont préféré, en général, les « Under-feed-Stoker » au chauffage au charbon pulvérisé ; il est juste de dire

(1) Communication présentée à la séance du 5 juin 1929 de la Société Française des Electriciens.

Sera discutée à la Semaine d'octobre, le 21 octobre 1929.

que les Américains n'ont pas eu à utiliser autant de déchets et de fines que les Ingénieurs français ; de plus, les installations de broyage central sont, en général, assez compliquées, d'un entretien difficile et très coûteuses.

Il peut se faire d'ailleurs que, sous l'influence de l'Ecole française, les appareils individuels de pulvérisation se développent assez en Amérique pour que la plupart des nouvelles installations américaines emploient, de nouveau le chauffage au pulvérisé.

Mais, il est juste de reconnaître, qu'au point de vue des calories consommées par kWh produit, les « Underfeed-Stoker » ont donné un résultat tout aussi bon que le pulvérisé.

3° *Pression.* — Ici encore, les Américains n'ont pas fait autant que l'on pouvait penser, un usage intensif des hautes pressions.

Si, d'une manière générale, ils se sont élevés progressivement de 25 à 35 kg : cm², ils n'ont jusqu'ici que deux stations centrales à 84 kg : cm² (Edgar-Station, à Boston et Lakeside, à Milewaukee).

Ils ne paraissent pas avoir recueilli de cet emploi des chaudières à haute pression des avantages décisifs, et ce sont justement les deux centrales de New-York qui marchent à 18 et à 26 kg : cm², pour lesquelles on a obtenu la consommation minima de 3 000 calories par kWh.

C'est, qu'en effet, outre les frais considérables de premier établissement que nécessite l'emploi des chaudières à haute pression, il y a la servitude de la resurchauffe qui consiste à renvoyer, dans la chaufferie, la vapeur sortant des turbines à très haute pression pour la resurchauffer de 200° à 400°C avant son entrée dans les turbines à basse pression ; on sait, en effet, que faute de prendre ces précautions qui sont excessivement coûteuses, le gain qui résulte de l'emploi de la haute pression est absolument illusoire.

Da reste, les Ingénieurs américains n'ont pas caché que, même avec la resurchauffe, l'économie de consommation résultant de l'emploi des très hautes pressions ne dépasse pas 4 à 5 pour cent, c'est-à-dire que si l'on parlait d'une consommation de 4 500 calories, on ne pouvait pas descendre au-dessous de 4 300 calories, ce qui n'est pas évidemment un résultat très brillant.

4° *Température.* — Il semble bien que, jusqu'à présent, les Américains se tiennent aux environs de 400°C pour la vapeur sortant des surchauffeurs des chaudières; nous n'ignorons pas, d'ailleurs, que l'emploi d'une haute température initiale conjuguée avec une pression de 25 à 30 kg est tout aussi économique que l'emploi d'une température plus basse conjuguée avec une très haute pression.

Dans cet ordre d'idées, les Ingénieurs américains étudient en ce

moment des installations dans lesquelles la température de la vapeur sera portée à 450°C ; il faut évidemment employer dans les turbines des aciers de composition tout à fait spéciale et, ces derniers temps, on a substitué au nickel et au chrome employés jusqu'à présent, le tungstène et le molybdène.

5° *Puissances des groupes électrogènes.* — On peut dire que les Ingénieurs américains ne descendent plus jamais au-dessous de 50 000 kW et, toujours en vue d'obtenir une consommation minima de calories par kWh produit, la tendance actuelle de l'Ecole américaine consiste à installer, au lieu et place des anciens groupes déjà importants de 50 000 kW, des groupes de 100 000, 150 000 et même 200 000 kW ; ils peuvent alors réaliser des consommations de vapeur de l'ordre de 3,75 kg par kWh, ce qui leur permet, avec des charbons à 7 000 calories produisant 8,50 kg de vapeur par kg de charbon, de ramener leur consommation unitaire à $3,75 : 8,50 = 0,440$ kg de charbon par kWh, c'est-à-dire : $0,440 \times 7\,000 = 3\,080$ calories par kWh.

6° *Type des groupes électrogènes.* — Les unités de 50 000 kW sont, tantôt à simple flux et un seul corps de turbine, tantôt à double flux et deux corps de turbines, mais ces deux corps de turbines étant embrochés tous les deux sur le même arbre et attaquant le même alternateur.

Pour les groupes de plus de 100 000 kW, les Américains emploient ce qu'ils appellent le type cross-compound, c'est-à-dire 2 ou 3 corps de turbines actionnant chacun un alternateur dont la puissance unitaire est en général de 50 000 à 70 000 kW.

Pour réaliser un groupe électrogène de 200 000 kW tel que celui de State-Line, on aura trois corps de turbines, un à haute pression et deux à basse pression avec, sur chaque corps, un alternateur de 70 000 kW.

Il y a toutefois, une installation actuellement en cours avec des alternateurs de 90 000 kW, ce sont les plus puissants ; ces alternateurs sont actionnés par 2 ou 3 corps de turbines embrochés sur le même arbre, les corps haute pression étant alimentés à une pression de 40 ou 50 kg : cm².

On a été limité jusqu'ici pour la puissance des alternateurs, par la difficulté considérable de leur refroidissement. On a employé des ventilateurs faisant circuler, autour des enroulements, une masse d'air refroidie sur son parcours par un réfrigérant à tubes d'eau.

Plus récemment, les Américains ont essayé de supprimer ces ventilateurs en les remplaçant par une atmosphère close d'hydrogène à la pression atmosphérique ou même à une pression supérieure.

7° *Tension des alternateurs.* — Elle est actuellement de l'ordre de 13 000 à 15 000 V.

Les alternateurs du groupe électrogène de State-Line sont même à 22 000 V, mais il faut reconnaître que, dans ce domaine et jusqu'à présent, ce sont les Ingénieurs anglais qui tiennent la tête, puisqu'ils ont en marche, depuis un an, dans une centrale des environs de Londres, un alternateur qui donne 33 000 V et qui est connecté directement au réseau de câbles souterrains sans transformateur intermédiaire.

8° *Vitesse*. — Les Américains employant encore maintenant deux et même trois fréquences, c'est-à-dire 25, 50 et 60 p : s, les vitesses normales sont de 1 200, 1 500, 1 800, 3 000 et 3 600 t/mn.

La vitesse de 3 600 t/mn a pu être réalisée sur les turbines de 10 000 kW, marchant à très haute pression dans les centrales d'Edgar-Station et Lakeside.

9° *Chaudières à Water-Walls*. — Il nous faut parler maintenant du progrès considérable qui a été réalisé par un Ingénieur de New-York, dans la conception et la construction des chaudières de Hell-Gate et East-River.

Cet Ingénieur, M. MURRAY, n'a pas hésité à remplacer purement et simplement les parois ordinairement en briques réfractaires des foyers des chaudières, par les faisceaux tubulaires de vaporisation, de façon à constituer ce qu'il a appelé des Water-Walls, c'est-à-dire des parois entièrement parcourues par l'eau à vaporiser.

M. MURRAY créa pour cet usage des tubes spéciaux à ailettes s'emboîtant les uns dans les autres et constituant les nouvelles parois des foyers ; derrière ces tubes et extérieurement, il répandit une couche de ciment mélangé à de la brique diatomite de 10 cm d'épaisseur et ceci lui permit d'obtenir des vaporisations de 80 à 100 kg par m² de surface de chauffe.

Cette concentration excessive de la production de vapeur dans un petit nombre de chaudières, permit à M. MURRAY de produire :

30 000 kW avec	1 800 m ²
40 000 "	2 400 "
60 000 "	3 600 "
80 000 "	4 800 "
100 000 "	6 000 "
150 000 "	9 000 "
200 000 "	12 000 "

Ceci a pu permettre de réaliser un indice superficiel de centrale, c'est-à-dire un rapport de la surface de chauffe au nombre de kW pro-

duits excessivement bas : tandis qu'en France, cet indice superficiel est compris entre 0,10 et 0,18 m², en Amérique, il est tombé à 0,06 m² et ceci uniquement, grâce à l'emploi des chaudières Murray.

Or, étant donné que l'on ne peut guère espérer brûler moins de 7 kg de charbon par m² d'indice superficiel et par heure, on voit que dans les chaudières françaises, on ne pourra pas brûler moins de :

$$7 \times 0,10 = 0,700 \text{ kg par kWh,}$$

tandis que dans les chaudières américaines on pourra descendre à :

$$7 \times 0,06 = 0,420 \text{ kg par kWh.}$$

Ce qui veut dire que pour un charbon à 7 000 calories, on pourra descendre difficilement en France au-dessous de :

$$7\,000 \times 0,700 = 4\,900 \text{ calories par kWh,}$$

tandis qu'en Amérique, on pourra descendre, grâce à l'innovation de M. MURRAY, jusqu'à : $7\,000 \times 0,42 = 2\,940$ calories par kWh.

On voit ainsi l'énorme progrès que les idées de M. MURRAY ont permis de réaliser.

10° *Soutirage de vapeur.* — Le dispositif généralisé des soutirages de vapeur, a permis également aux Ingénieurs américains d'abaisser leur consommation de calories.

Il consiste à prélever, en 2 ou 3 points des corps de turbines à basse pression, une certaine quantité de vapeur qui sert à réchauffer l'eau d'alimentation des chaudières, ce qui permet de ne plus installer d'économiseurs dans la chaudière et de remplacer ces économiseurs par un réchauffeur d'air, et d'injecter dans les foyers de l'air réchauffé jusqu'à 300°C.

Ce double avantage, de pouvoir réchauffer jusqu'à 160°C l'eau d'alimentation, grâce aux soutirages de vapeur et de réchauffer l'air de combustion jusqu'à 300°C, grâce au réchauffeur d'air, a encore procuré une économie de 3 à 4 pour cent sur les calories consommées par kWh.

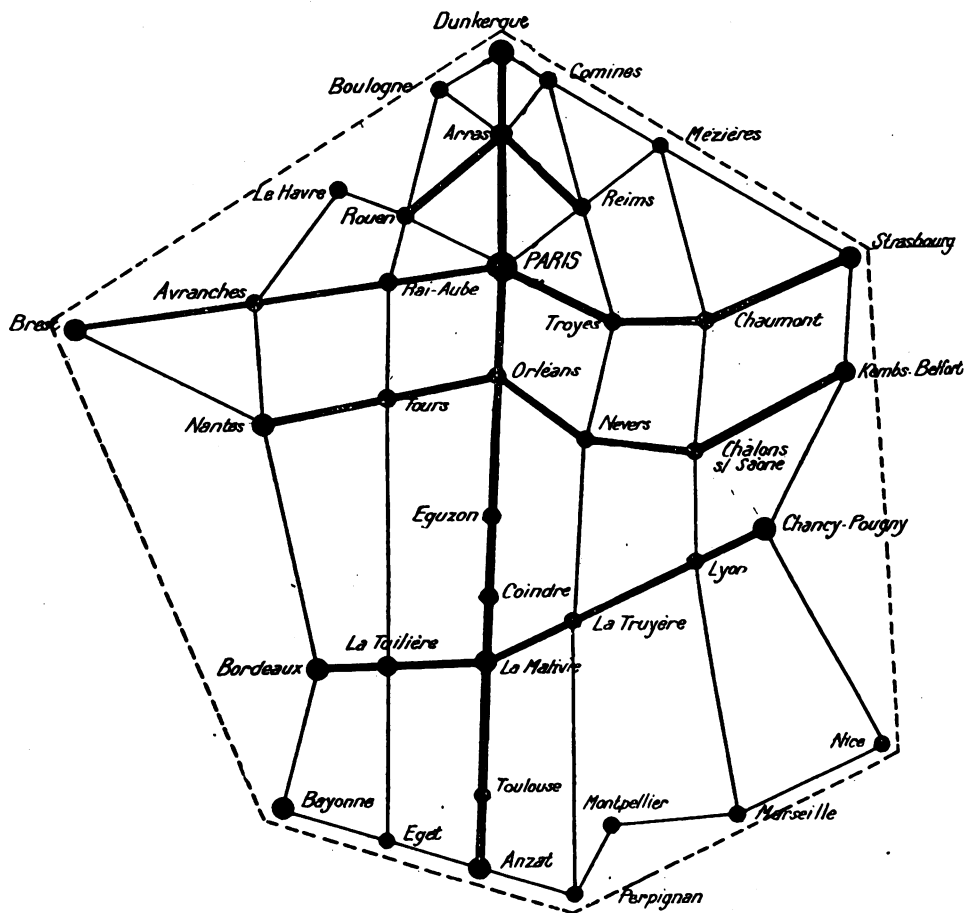
Conclusions.

Il semble qu'il y ait de très nombreux enseignements à tirer de tous les faits que nous venons de rappeler et, bien que depuis dix ans, nous nous soyons inspirés dans la construction de nos Centrales thermiques françaises, d'un grand nombre d'idées américaines, nous aurions pu peut-être, aussi bien pour la puissance des chaudières que pour celle des groupes électrogènes et pour la tension de nos grands transports d'énergie, aller un peu plus de l'avant.

Or, si l'on examine une carte générale de la France et que l'on considère l'ensemble des stations centrales importantes déjà installées ainsi que de leurs lignes de jonction, nous voyons que dans toute la zone

TRIANGULATION ÉLECTRIQUE DE LA FRANCE

Lignes à 220.000 Volts (Projet).



comprise entre le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais et le bassin de la Seine, qui s'étend de Rouen à Reims en passant par Paris, il y a place pour de puissantes lignes de jonction qui permettraient au bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais d'apporter un secours important au bassin de la Seine.

Il serait alors tout indiqué d'installer un ou plusieurs groupes électrogènes de 200 000 kW, alimentés chacun par 4 chaudières de 3 000 m² de surface de chauffe, et recevant leur charbon directement de la concession la plus voisine, pour envoyer l'énergie produite par les alternateurs constituant le groupe de 200 000 kW sur Rouen, Paris et Reims par des lignes à 220 000 V.

Les différents groupes électrogènes de 200 000 kW ne seraient pas obligatoirement dans une même salle de machines, et seraient indépendants les uns des autres au point de vue de la production de vapeur.

Seuls, leurs alternateurs pourraient à la rigueur débiter leur courant sur un poste de « Load-dispatching » situé à Arras, et c'est de ce poste centralisateur que les 500 000 ou 600 000 kW disponibles seraient dirigés sur Rouen, Paris et Reims.

Nous avons indiqué sur une carte spéciale, comment pourrait être conçu un réseau général à 220 000 V qui engloberait toute la France et jonctionnerait, bien entendu, les principales Centrales thermiques ou hydrauliques se trouvant sur leur passage.

4 grandes lignes partageraient le pays en 8 régions, savoir :

1° Dunkerque, Paris, Orléans, Eguzon, La Mativie, Anzat.

2° Brest, Paris, Strasbourg.

3° Nantes, Orléans, Belfort.

4° Bordeaux, La Mativie, Chancy-Pouigny.

Bien entendu les chaudières des groupes de 200 000 kW seraient des chaudières à Water-Walls du type Murray, et les groupes électrogènes auraient une constitution analogue à celui de State-Line (3 corps de turbines attaquant chacun un alternateur de 70 000 kW).

Chacun de ces groupes de 200 000 kW serait installé aux abords du bassin houiller, ce qui permettrait de produire le kWh dans des conditions très économiques et de couvrir largement les frais du transport à 220 000 V, qui seraient certainement inférieurs aux frais de transport du charbon par chemin de fer ou par bateaux.

Principales centrales thermiques américaines.

Noms des Centrales	CHAUDIÈRES				GROUPES ÉLECTROGÈNES				INDICE superficiel Index français = 4,180	CARACTÉRISTIQUES SPÉCIALES et OBSERVATIONS
	Surfaces	Note de chauffage	Pres- sion (t)	Tempé- rature (t)	Puissance	Type	Tension	Vite s ^a		
Trenton-Channel <i>Detroit</i>	15×3 600 =32 000 m ²	Pulvérisé Centrale à boyeux Raymond 6 1/2	26 kg	330°	6×50' (0 = 3 000 000 kW) 1×50 000 (16+28+6) 1×52 000 (30+30+2) 1×63 000 (17+43+2) 1×76 000 (28+16+2) 1×103 000 (47+55+3) = 3 150 000 kW	Simple flux	12 600 V	1 250 t: mn	$\frac{39}{300} = 0,130$	Pas de resurchauffe. Soulirage aux 14, 17 et 21e étages.
Crawford-Avenue <i>Chicago</i>	10×1 500 =45 000 m ²	Grille mécanique	35 kg	400°	12×50' (0 = 6 000 000 kW) 2×40 000 1×163 000 (49+2×35+2×3) = 2 450 000 kW	Cross compound	11 000 V	1 800 t: mn	$\frac{45}{145} = 0,310$	Resurchauffe dans chaudière spéciale. Soulirage dans la tur- bine basse pression.
Richmond <i>Philadelphie</i>	72×1 000 =72 000 m ²	Underfeed stoker	26 kg	400°	12×50' (0 = 6 000 000 kW) 2×40 000 1×163 000 (49+2×35+2×3) = 2 450 000 kW	Tandem-compound	13 200 V	1 800 t: mn	$\frac{72}{600} = 0,120$	Pas de resurchauffe. Soulirage de vapeur.
Philo <i>Ohio</i>	24×1 000 =24 000 m ²	Underfeed stoker	35 kg	400°	12×50' (0 = 6 000 000 kW) 2×40 000 1×163 000 (49+2×35+2×3) = 2 450 000 kW	Cross-compound	14 000 V	1 850 t: mn	$\frac{24}{245} = 0,098$	Resurchauffe dans chaudière spéciale. Soulirage dans la tur- bine basse pression.
Hell-Gate <i>New-York</i>	12×1 600 8×1 400 9×1 100 =33 300 m ²	Underfeed stoker	18 kg	330°	3×35 000 2×40 000 2×50 000 (25+00+2+00) 1×160 000 (75+00+85+00) = 4 150 000 kW	Simple flux Tandem-compound Cross-compound	13 200 V et 11 000 V	1 850 t: mn et 1 500 t: mn	$\frac{33,3}{445} = 0,075$	Chaudières à parois tu- bulaires. Pas de resur- chauffe. Soulirage de vapeur. Centrale à 25 et 60. Convertis- seur de fréquence.
East-River <i>New-York</i>	44×1 400 =61 600 m ²	Pulvérisé Centrale à boyeux Raymond 15 1/2	26 kg	370°	2×60 000 1×120 000 (35+00+6+00) = 9 600 000 kW	Simple flux Cross-compound	13 200 V et 11 400 V	1 800 t: mn et 1 500 t: mn	$\frac{61,6}{960} = 0,064$	Chaudières à parois tu- bulaires. Pas de resur- chauffe. Soulirage d; vapeur aux 14, 14 et 18e étages. Centrale à 25 et 60. Convertis- seur de fréquence.
Edgar-Weymouth <i>Boston</i>	3×1 800 3×1 400 =9 600 m ²	Underfeed stoker	84 kg	400°	1×32 000 (30+2) 1×35 000 (3+30+2) 1×75 000 (10+60+5) = 1 42 000 kW	Simple flux Cross-compound	14 000 V	3 600 t: mn 1 800 t: mn	$\frac{96}{142} = 0,67$	Chaudières à parois tubulaires. Resur- chauffe. Soulirage de vapeur aux haute et basse pressions. Pompe alimentaire de chaudière de 2 500 ch à 3 600 l: mn.
State-Line <i>Indiana</i>	Cette station contiendra le groupe le plus puissant du monde qui sera de 208 000 kW				Cross-compound	Cross-compound	22 000 V	1 800 t: mn		1er avril 1920.

Discussion.

M. DUVAL ajoute quelques indications complémentaires recueillies pendant un voyage qu'il a effectué en Amérique en septembre-octobre 1928, et durant lequel il a visité 13 grandes usines thermiques.

Il signale que si la généralisation de l'emploi des foyers à charbon pulvérisé ne semble pas s'être réalisée d'une façon rapide, il a cependant constaté dans toutes les usines visitées, que la Direction se préoccupait d'effectuer des essais sur quelques chaudières transformées pour emploi du charbon pulvérisé. Il y a un mouvement très net vers l'adoption des chaudières à tubes d'eau dans le foyer (type Murray), chauffées au charbon pulvérisé. On constate également une tendance à remplacer les grandes centrales de pulvérisation par des dispositions de pulvérisation individuelle ou par groupes de chaudières. A ce point de vue, nous pourrions citer l'opinion de M. MAILLOUX qui estime que, parmi les centrales récentes installées en Amérique, trente pour cent possèdent des chaudières fonctionnant par pulvérisation.

Relativement à l'emploi des hautes pressions, il ne faut pas non plus s'attendre à une adoption brusque et rapide de celles-ci, pour diverses raisons. Tout d'abord, les Etats-Unis sont riches en gisements charbonniers et ont beaucoup moins d'intérêt que certaines nations à tirer la quintessence du rendement thermique des chaufferies, cependant deux belles usines récentes à la pression de 35 kg : cm² et une à la pression de 84 kg : cm², sont en fonctionnement satisfaisant.

Il faut remarquer d'ailleurs que ce mouvement vers l'adoption des hautes pressions ne peut qu'être lent et progressif, car les usines à haute pression doivent être des usines de base à haute utilisation et à charge aussi constante que possible ; elles ne peuvent donc s'installer que sur de grands réseaux en remplacement de vieilles usines que l'on fera passer dans la situation de réserve ou d'appoint. La même remarque s'applique d'ailleurs aux chaudières à tubes d'eau autour du foyer, du type Murray, dont le fonctionnement n'est rationnel et économique qu'à charge sensiblement constante.

En ce qui concerne les grosses machines génératrices, il est exact que bien souvent les groupes de 100 000 kW et plus sont des groupes comprenant deux alternateurs dont les turbines de commande sont en cascade; cependant on installe à New-York, un alternateur unique de 165 000 kW, et les Américains envisagent favorablement l'emploi de telles machines, en vue de gagner de la place dans les grandes villes où les usines sont très resserrées, de plus ils construisent des machines très robustes et n'ont aucune crainte sur l'emploi de telles puissances.

A signaler, pour les compensateurs synchrones, l'emploi de groupes de 50 000 kW sur les lignes d'arrivée à Los Angeles.

Pour les transmissions à très haute tension, le retard des réseaux français n'est pas aussi grand qu'on pourrait croire, malgré les difficultés causées par la guerre et l'après-guerre ; en effet, si l'on peut visiter en Californie deux réseaux de transport à 220 000 V de 380 km et 325 km, ce ne sont que des lignes régionales installées dans un seul état et destinées à desservir des grands centres tels que San-Francisco et Los Angeles ; il faut se rendre à Philadelphie pour trouver un réseau à 220 000 V de construction récente, encore inachevé, qui constituera un véritable réseau d'interconnexion, destiné à réunir plusieurs grands réseaux alimentant de grands centres tels que Philadelphie, Baltimore, New-York et Washington. Ce réseau sera très comparable au réseau du centre de la France dont la ligne à 220 000 V, destinée à relier le Massif Central à Paris qui aura une longueur de 550 km est construite ou en construction sur 450 km à ce jour.

Si l'on considère les réseaux souterrains à 60 000 V, qui sont nombreux en Amérique dans les grandes villes on pourra remarquer que la banlieue parisienne est également desservie par un vaste réseau à 60 000 V dont le fonctionnement est parfait depuis plusieurs années. Les Américains se préoccupent d'essayer la réalisation de réseaux souterrains à 132 000 V que l'extension de la puissance transportée et des distances de transport rendront nécessaires dans l'avenir, mais les deux installations ainsi réalisées à New-York et à Chicago, ne constituent que des essais.

Quelle que soit l'utilité des grands réseaux d'interconnexion, qui est aujourd'hui admise en tous pays, on doit cependant envisager que le prix des lignes de transmission est à ce jour fort élevé et que celles-ci ne peuvent être construites que si leur utilisation conduit à une rentabilité assurée du capital ; il ne fait aucun doute que la région parisienne sera reliée un jour aux centres miniers du Nord ; cependant on doit demeurer satisfait si l'on considère les grands progrès réalisés depuis deux ans dans l'aménagement du réseau général d'interconnexion en France ; il est maintenant certain que, dans très peu d'années, tous les grands centres de consommation de la France seront reliés à plusieurs centres de production, de manière à permettre l'utilisation la plus rationnelle de nos ressources hydrauliques et thermiques.

M. DARRIEUS fait observer que l'emploi des hautes pressions est peut-être freiné par les situations acquises dans les centrales anciennes et par la nécessité d'un facteur élevé d'utilisation. Il s'associe d'ail-

leurs au vœu formulé par M. MATHIVET de voir la France recouverte d'un réseau complet à haute tension qui permettra d'abaisser les prix de revient dans toutes les industries desservies.

M. GENISSIEU fait remarquer que les usines dont a parlé M. MATHIVET sont situées au bord de fleuves abondants, ce qui leur assure une alimentation pratiquement illimitée en eau de condensation. C'est que dans l'immense continent américain se trouvent de vastes bassins, et par suite des cours d'eau de débit considérable. Il n'en est pas de même dans la presqu'île qui constitue l'Europe, surtout en France qui en est la partie la plus resserrée. Il sera donc très difficile de pouvoir trouver chez nous des emplacements acceptables pour des usines de plusieurs centaines de milliers de kW. Dans la région parisienne, avec les 30 mètres cubes par seconde que roule la Seine en étiage, on sera vite limité. Dans la région du Nord, encore plus pauvre en eau, il est très douteux que l'on puisse même exploiter des centrales aussi importantes que celles qui existent aujourd'hui à Paris.

M. MATHIVET. — J'ai noté que l'utilisation annuelle, dans les grosses unités que je préconise, doit être de 4 000 heures pour que ces unités soient économiques, mais je ne crois pas que cette utilisation de 4 000 h soit impossible à réaliser en France, surtout si on a soin de grouper des usines chimiques à proximité des groupes électrogènes.

J'ai noté également que ce sont surtout les câbles à 132 000 V fournis par l'Europe à l'Amérique, qui ont donné les meilleurs résultats.

Je regrette seulement que ces câbles aient eu besoin de traverser l'Atlantique pour affirmer leur valeur.

J'en arrive à l'objection de M. GENISSIEU qui, pour un esprit mal informé, pourrait paraître décisive.

Nous avons actuellement dans l'ensemble de nos concessions minières 600 000 kW installés, produisant environ, par jour, 6 000 000 de kWh. Or, ces 6 000 000 de kWh sont parfaitement assurés à l'aide de batteries de réfrigérants dans lesquelles on fait effectivement circuler 250 litres par kWh, c'est-à-dire 1 500 000 m³ par jour, mais nous n'avons à fournir, comme eau fraîche, pour ces 1 500 000 m³, à l'aide de nos pompes de forage, que 2 pour cent de ce volume, c'est-à-dire, 30 000 m³ d'eau vierge par 24 heures ou 5 litres par kWh.

Chacun de nos forages donnant en moyenne 2 000 m³ par 24 heures, on voit que l'ensemble de 600 000 kW ne demande que 15 forages et que, pour une unité de 200 000 kW, il suffirait de 5 ou 6 forages donnant au total 10 000 à 12 000 m³ par 24 heures.

Le problème est donc beaucoup plus simple que le pense M. GENISSIEU.

M. GENISSIEU répond qu'un forage donnant même 5 000 m³ par jour, ne correspondrait guère qu'à une production de 20 000 kWh sans réfrigérant.

OPTIQUE DES SURFACES DIFFUSANTES ⁽¹⁾

Par J. DOURGNON

Ingénieur à la Société pour le Perfectionnement de l'Eclairage

et P. WAGUET

Ingénieur au Laboratoire Central d'Electricité

SOMMAIRE

- I. — Généralités. — Position du problème. — Vecteur éclairement.
- II. — Calcul des éclairagements produits par des sources non ponctuelles de brillance constante.
- III. — Equilibres lumineux.
- IV. — Surfaces de brillance constante.
- V. — Calcul des flux et des éclairagements moyens (facteur d'utilisation d'un espace clos).
- VI. — Applications pratiques diverses : plafonds lumineux ; réflecteurs diffusants ; globes diffuseurs.

I. — POSITION DU PROBLÈME. — VECTEUR ÉCLAIREMENT.

Si l'on désirait présenter le problème de l'éclairage sous sa forme la plus générale, on pourrait, nous semble-t-il, le faire de la façon suivante :

1° Déterminer, pour chaque position possible de l'observateur, la *brillance* de tous les points qui se trouvent dans son champ de vision.

2° Dédire de la connaissance des brillances précédemment déterminées, les *sensations visuelles* qui en résulteraient pour le dit observateur et ses répercussions sur les conditions de travail, la sensation de bien-être, l'émotion esthétique, etc.

Même en nous restreignant à la première partie de ce problème, qui seule d'ailleurs relève de l'art de l'ingénieur, on peut se rendre compte facilement à quel point la question ainsi posée est extraordinairement complexe.

Dans tout espace, couvert ou découvert, tous les corps ambiants jouent un rôle au point de vue de l'éclairage, et ceux sur la surface desquels on désire le plus connaître les brillances (page d'un livre, organe de machine sur lequel on travaille, acteur, convive..., etc.), sont essentiellement mobiles et variables et par cela même ne permettent aucune détermination.

Généralement, on admet que les corps mobiles que l'on désire juste-

(1) Cette communication sera discutée à la Semaine d'octobre le mardi 22 octobre 1929.

ment éclairer avec le plus de soin, ne réagissent pas sensiblement sur l'éclairage ambiant ⁽¹⁾ et on néglige leur action. On se propose alors de résoudre les deux questions suivantes :

a) Détermination de la brillance de divers points des surfaces fixes (plafonds, murs, etc...), ce qui est un problème relevant généralement de la décoration ou de la publicité.

b) Détermination, en divers points de l'espace, de certaines caractéristiques permettant de connaître *a priori* la façon dont un corps, ayant lui aussi des caractéristiques données, se comportera s'il est placé au point de l'espace considéré ⁽²⁾.

On s'est contenté, jusqu'à ces derniers temps, de calculer l'éclairement horizontal sur le plan utile, mais on se rend compte maintenant à quel point cette notion est insuffisante car :

1° Elle ne donne aucune indication sur l'aspect général que pourra présenter un local, puisque l'éclairement sur le plan fictif ne nous est pas perceptible et que seule la connaissance des brillances des luminaires et des parois pourrait nous fournir un renseignement à ce sujet ⁽³⁾.

2° Elle ne saurait non plus donner une indication complète sur la façon dont se comportera un corps, même placé sur le plan utile, puisqu'elle ne donne aucune indication en ce qui concerne l'éclairement sur les divers plans inclinés, la direction des ombres portées et la diffusion ⁽⁴⁾, etc.

(1) Ceci n'est pas toujours admissible : ainsi, des expériences de MM. WARD HARRISON et EARL ANDERSON ont montré que l'emploi de nappes blanches sur des tables (dans un restaurant par exemple) pouvait augmenter dans des proportions non négligeables l'éclairement sur la surface de ces tables. On peut même (en théorie tout au moins) aller plus loin dans cette voie. Supposons que nous ayons un local avec des parois ayant un haut facteur de réflexion et qu'une portion suffisamment importante de la surface de ces parois soit utilisée, le flux dit « utile », c'est-à-dire le flux tombant sur la surface utile peut être supérieur au flux total émis par les sources. Ceci n'est pas contradictoire avec le principe de la conservation de l'énergie car, au point de vue strictement énergétique, seul se trouve utilisé le flux atteignant la rétine de l'observateur.

(2) De nombreuses études ont été faites dernièrement sur cette question dans les pays de l'Europe Centrale.

(3) Prenons, par exemple, une salle construite, mais non encore décorée et dont les parois se trouvent être en plâtre blanc, et la même salle après qu'on a recouvert ses parois d'un enduit ou de tentures plus ou moins absorbants. Les sensations d'intensité d'éclairage qu'on éprouvera dans les deux cas seront absolument différentes, car le flux réfléchi par les parois pourra dans le deuxième cas, être réduit d'une façon très considérable. De même, la présence de spectateurs aux costumes sombres donne souvent aux salles de spectacles remplies de public un aspect beaucoup moins lumineux qu'aux salles vides.

(4) Il est très difficile de donner une définition précise de la diffusion de la lumière en un point de l'espace. Disons simplement que la lumière sera considérée comme d'autant plus diffuse que la pénombre portée par un objet sur un

Pour permettre de résoudre les différents problèmes que nous venons de poser, on a déjà proposé un certain nombre de théories qui comportent généralement l'introduction de grandeurs particulières dont l'usage n'était pas encore apparu en photométrie. Nous ne nous étendrons pas ici sur ces questions qui ne semblent pas être encore bien au point, mais nous exposerons dans le présent rapport, un certain nombre de méthodes élémentaires ne faisant usage que des données classiques, et dont l'ensemble peut être considéré comme la base d'une étude ultérieure susceptible de serrer de plus près la solution générale du problème de l'éclairage.

Nous diviserons notre exposé en trois parties.

Dans la première, nous chercherons à déterminer les éclairagements produits par des sources (primaires ou secondaires, peu importe) de formes et de brillances données.

Dans la deuxième, nous chercherons à déterminer la brillance des sources secondaires en fonction des caractéristiques d'émission des sources primaires.

Enfin dans la dernière partie, nous donnerons quelques applications pratiques des théories exposées.

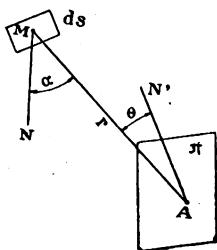


Fig. 1.

On sait que l'éclairage produit par un élément de source dS , en un point A d'une surface donnée, s'exprime par la formule

$$dE = \frac{B dS \cos \alpha \cos \theta}{r^2} \quad (1)$$

plan situé derrière lui sera plus importante. Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer ailleurs (J. DOURGNON et P. WAGUET), Les diffuseurs de lumière. *Revue Générale de l'Electricité*, 23 mars 1913, tome XXV, page 435), il est indispensable de bien préciser les deux sens du mot diffus ; dans le sens employé précédemment, il indique une propriété spéciale d'un point de l'espace ; dans le sens qu'il a dans une expression telle que « réflexion diffuse », il indique les modalités suivant lesquelles se produit le phénomène de réflexion. Notons en passant, qu'on peut fort bien produire un éclairage diffus en un point, au moyen d'appareils réfléchissant régulièrement la lumière.

dont les différentes grandeurs sont suffisamment explicitées sur la figure 1.

Considérons maintenant un vecteur ⁽¹⁾ dont le point d'application est A ; la direction, la droite MA ; le sens, celui de A à M ; et l'intensité, la valeur

$$dV = \frac{BdS \cos \alpha}{r^2}, \quad (2)$$

c'est-à-dire la valeur maxima de l'éclairement au point A correspondant à un plan normal à la droite MA. L'éclairement sur un plan π faisant un angle θ avec le plan précédent pourra donc être représenté par un vecteur qui sera la projection sur la normale au plan considéré du vecteur précédemment défini.

Plus généralement, supposons que nous ayons une source de dimen-

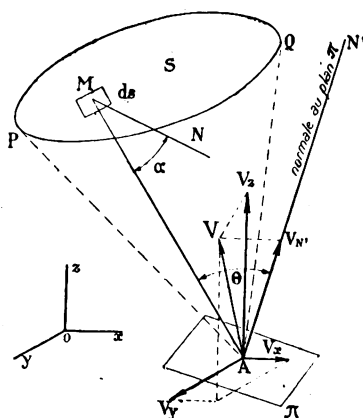


Fig. 2.

sions finies (fig. 2), l'éclairement en un point A d'une surface donnée pourra se calculer au moyen de la formule

$$E = \iint_S \frac{BdS \cos \alpha \cos \theta}{r^2} = \iint_S \frac{Bd\sigma \cos \theta}{r^2}. \quad (3)$$

Si les dimensions de la source sont négligeable par rapport à r , on pourra considérer θ et r comme constants et écrire

$$E = \frac{\cos \theta}{r^2} \iint_S B d\sigma = \frac{I(\lambda, \mu, \nu) \cos \theta}{r^2}, \quad (4)$$

à condition de poser

$$I(\lambda, \mu, \nu) = \iint_S B d\sigma, \quad (5)$$

(1) HYDE a donné au vecteur dont il est question dans ce paragraphe le nom de « Illuminating Vector » (EDWARD HYDE Geometrical theory of radiating surfaces with discussion of light tubes. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 1907, vol 3, page 81). Nous proposons d'adopter l'expression « Vecteur Eclairement ».

expression que nous pourrions appeler intensité de la source non ponctuelle dans la direction (λ, μ, ν) . Le vecteur ayant une longueur proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$ et une direction (λ, μ, ν) peut s'appeler vecteur éclairement. Sa projection sur la normale à un plan passant par son point d'application représente l'éclairement sur ce plan.

Dans le cas général d'une source non ponctuelle, on peut encore définir le vecteur éclairement comme étant un vecteur dont la direction est normale au plan pour lequel l'éclairement est maximum et dont la longueur est proportionnelle à cet éclairement maximum. Ce vecteur V est la résultante des vecteurs dV précédemment définis.

En effet, l'éclairement sur un plan donné est égal (d'après les formules (2) et (3) à la somme des projections sur la normale à ce plan des vecteurs dV , il est donc égal à la projection de la résultante V de ces vecteurs. Ce vecteur V , étant le plus grand des vecteurs représentatifs des éclairéments (puisque les autres se déduisent de lui par projection), correspond bien à l'éclairement maximum.

Les composantes de V en coordonnées cartésiennes sont évidemment les vecteurs représentant les éclairéments pour trois plans perpendiculaires aux trois axes coordonnés, on a donc

$$\vec{V} = \vec{V}_x + \vec{V}_y + \vec{V}_z, \quad (6)$$

avec

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \int \int_S \lambda \frac{BdS \cos \alpha}{r^2} \\ V_y &= \int \int_S \mu \frac{BdS \cos \alpha}{r^2} \\ V_z &= \int \int_S \nu \frac{BdS \cos \alpha}{r^2}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

λ, μ, ν étant les cosinus directeurs du rayon MA .

Ce qui précède suppose que la source S n'est pas rencontrée par le plan π sur lequel on mesure l'éclairement. — Autrement dit, on suppose que ce plan est extérieur au cône PAQ .

Dans le cas où les plans perpendiculaires à V_x, V_y ou V_z rencontrent la source, ces vecteurs ne représentent plus des éclairéments, mais ils peuvent encore servir d'intermédiaires mathématiques pour la détermination de l'éclairement sur un plan ne rencontrant pas la source.

II. — CALCUL DES ÉCLAIREMENTS PRODUITS PAR DES SOURCES NON PONCTUELLES DE BRILLANCE CONSTANTE.

D'une façon générale, on ne peut donc introduire la notion d'intensité lumineuse d'une source non ponctuelle quand on considère cette source uniquement à distance finie, mais on peut évidemment fort bien parler d'éclairement produit par une source non ponctuelle en un point donné d'une surface quelconque.

Pour calculer cet éclairement dans le cas de sources de brillance uniforme, on dispose d'un certain nombre de méthodes que nous allons exposer successivement.

1^{re} Méthode (1).

Traçons (fig. 3) une sphère de rayon quelconque R tangente à la surface sur laquelle on désire déterminer l'éclairement au point

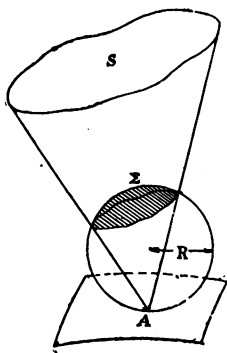


Fig. 3.

précis A. Le cône de sommet A s'appuyant sur le contour apparent de la source S, délimite, sur la sphère, une surface d'aire Σ hachurée sur la figure. Cette surface fictive Σ , supposée de même brillance B que la source S, produira le même éclairement en A.

Or, nous savons que dans une sphère creuse, un élément de surface de brillance B produit sur toute la paroi un éclairement uniforme

(1) J. DOURGNON et P. WAGUET, Procédé de calcul des éclairagements produits par des sources non ponctuelles rayonnant suivant la loi de Lambert et de brillance constante. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 21 août 1921, tome 189, page 361.

proportionnel à l'aire Σ de cet élément. L'éclairement cherché est donc

$$E = \pi B \frac{\Sigma}{4\pi R^2} = B \frac{\Sigma}{4R^2}. \quad (8)$$

La valeur de R étant quelconque, on la choisira de façon que les calculs soient le plus simples possible ; par exemple, si on prend R égal à la moitié de l'unité de longueur choisie, on a une surface Σ_0 et la formule devient

$$E = B\Sigma_0. \quad (9')$$

2° Méthode (1).

On trace (fig. 4) une sphère de centre A et de rayon quelconque r sur laquelle le cône précédent découpe une certaine surface que l'on

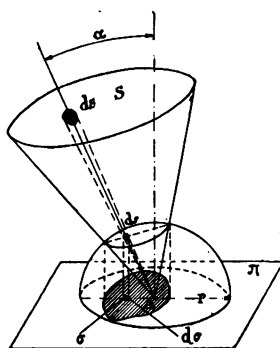


Fig. 4.

projette sur le plan π tangent, au point A , à la surface sur laquelle on veut déterminer l'éclairement. Soit σ l'aire de cette surface, on a

$$E = \frac{B\sigma}{r^2}. \quad (9)$$

En effet, considérons un petit élément dS de la source, il produira en A le même éclairement que le petit élément $d\sigma$ que le cône de sommet A découpe sur la sphère (dS étant supposé de brillance B égale à celle de la source). Or, cet éclairement a pour valeur

$$dE = \frac{B dS \cos \alpha}{r^2} = \frac{B d\sigma}{r^2},$$

(1) ONDRACEK. *Zeitschrift für Beleuchtung*. Mai 1922.

$d\sigma$ étant la projection de ds sur le plan π , d'où

$$E = \iint \frac{B d\sigma}{r^2} = \frac{B\sigma}{r^2}.$$

Si on prend r égal à l'unité de longueur et si l'on appelle σ_0 l'aire qui est alors projetée, on trouve

$$E = B\sigma_0. \quad (9)$$

3^e Méthode (1).

Nous savons que l'éclairement produit en un point par une source de brillance constante ne dépend que du contour apparent de cette source (on peut dire même, d'une façon plus générale, qu'il ne dépend que du cône qui a le point pour sommet et qui s'appuie sur la surface de la source). Il est donc possible, en appliquant la formule de STOKES, de transformer l'intégrale de surface donnant l'éclairement, en une intégrale curviligne prise le long du contour limitant la surface apparente.

M. YAMAUTI, qui est le premier, à notre connaissance, à avoir fait cette remarque, trouve pour l'intégrale curviligne, l'expression suivante (fig. 5)

$$E = \frac{B}{2} \int_c d\omega \cos \delta, \quad (10)$$

$d\omega$ étant l'angle sous lequel on voit du point A un élément dS du

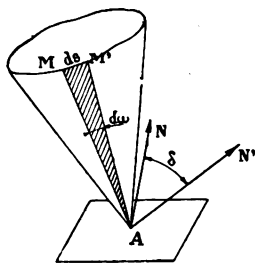


Fig. 5.

contour et δ l'angle que forme la normale au plan MM'A avec la normale au plan sur lequel on calcule l'éclairement.

(1) Z. YAMAUTI, *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, n° 194, Tokio, avril 1927.

d'où

$$E = \frac{\pi B \rho^2}{r^2} = \pi B \frac{\rho^2}{\rho^2 + x^2}.$$

c) Application de la 3^e méthode (fig. 8).

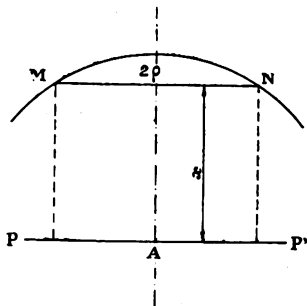


Fig. 7.

Nous avons

$$\cos \delta = \sin \widehat{CAM} = \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + x^2}}$$

$$d\omega = \frac{dS}{AM} = \frac{dS}{\sqrt{\rho^2 + x^2}}.$$

Nous pouvons donc écrire

$$E = \frac{B}{2} \int_S \frac{\rho dS}{\rho^2 + x^2} = \pi B \frac{\rho^2}{\rho^2 + x^2}.$$

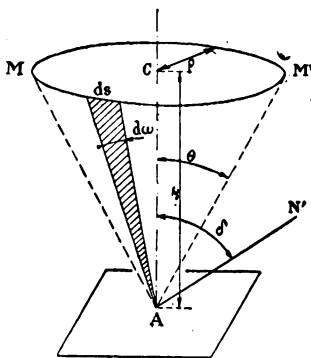


Fig. 8.

2° *Eclairements produits par une surface de brillance uniforme limitée par un contour polygonal.*

Le meilleur procédé pour traiter ce problème consiste généralement à appliquer la 3^e méthode et à intégrer l'équation [10] pour chaque élément de droite, δ étant constant pour chacun de ces éléments on a

$$E = \frac{B}{2} \sum \omega_i \cos \delta_i.$$

On retrouve ainsi très facilement les formules de HIGBIE et LEVIN ⁽¹⁾, dont un de nous a déjà mentionné une forme particulière ⁽²⁾.

Reprenons les notations de cette dernière étude et cherchons à déterminer l'éclairement produit en A (fig. 9) sur un plan horizontal ABCD, par un plan horizontal A'B'C'D', de brillance B', situé à une dis-

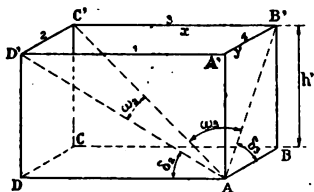


Fig. 9.

tance h' de A. Les angles δ_1 et δ_4 correspondants aux côtés A'D' et B'A' sont droits, les intégrales correspondantes à ces côtés sont nulles. On peut donc écrire

$$E = \frac{B}{2} [\omega_2 \cos \delta_2 + \omega_3 \cos \delta_3]$$

Or, on a

$$\cos \delta_2 = \frac{x}{\sqrt{h'^2 + x^2}}, \quad \cos \delta_3 = \frac{y}{\sqrt{h'^2 + y^2}},$$

$$\omega_2 = \arctg \frac{y}{\sqrt{h'^2 + x^2}}, \quad \omega_3 = \arctg \frac{x}{\sqrt{h'^2 + y^2}}.$$

D'où

$$E = \frac{B}{2} \left[\frac{x}{\sqrt{h'^2 + x^2}} \arctg \frac{y}{\sqrt{h'^2 + x^2}} + \frac{y}{\sqrt{h'^2 + y^2}} \arctg \frac{x}{\sqrt{h'^2 + y^2}} \right].$$

III. — EQUILIBRES LUMINEUX.

Jusqu'à présent, nous avons supposé que la brillance des surfaces éclairantes était connue.

Nous allons maintenant chercher comment on peut déterminer cette brillance dans un certain nombre de cas.

1° Enveloppe opaque fermée.

Considérons d'abord une enveloppe opaque fermée de facteur de réflexion ρ , dans laquelle on place une ou plusieurs sources émettant un flux global f .

(1) H. HIGBIE et A. LEVIN, Prediction of daylight from sloping windows. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, mars 1926, vol. XXI, page 273.

(2) Jean DOURGNON Nouvelle méthode de prédétermination des coefficients d'utilisation dans les projets d'éclairage d'espaces clos. *Revue Générale de l'Électricité*, 11 février 1928, tome XXIII, page 271.

Au moment où se trouve atteint l'équilibre lumineux ⁽¹⁾, le flux total F , qui atteint la paroi, est tel que le flux f émis par les sources soit complètement absorbé

$$f = (1 - \rho) F. \quad (11)$$

Cette formule est absolument générale, elle ne suppose rien, ni sur la forme de la surface, ni sur la répartition des sources, ni sur les indicatrices de diffusion des surfaces; il suffit que le facteur de réflexion ρ ait la même valeur en tous points et qu'il soit indépendant de la direction des rayons incidents.

Supposons maintenant que, pour une raison quelconque, l'éclairement *résultant* sur les parois (c'est-à-dire celui produit par le flux total F) soit uniforme, celui-ci sera donné par la formule

$$E = \frac{F}{S}$$

S étant l'aire de l'enveloppe interne. Si la surface rayonne suivant la loi de Lambert, sa brillance sera

$$B = \frac{\rho E}{\pi} = \frac{\rho f}{\pi S(1 - \rho)}. \quad (12)$$

2° Enveloppe fermée translucide.

Soient ρ , τ et α , les facteurs de réflexion de transmission et d'absorption en chaque point de la paroi. On a toujours

$$F = \frac{f}{1 - \rho}.$$

Le flux F' émergent de cette enveloppe est

$$F' = \tau F = \frac{\tau}{1 - \rho} f, \quad (13)$$

si l'on suppose que le flux ne peut traverser complètement la paroi qu'une seule fois, c'est-à-dire si l'on suppose que l'enveloppe est convexe.

Si la brillance émergente B' est uniforme et si l'indicatrice de diffusion par transmission est celle d'une surface obéissant à la loi de Lambert, on a

$$B' = \frac{F'}{\pi S} = \frac{\tau f}{\pi S(1 - \rho)}. \quad (14)$$

(1) Cet équilibre peut évidemment en pratique être considéré comme atteint instantanément.

3° Surface opaque limitée par une courbe plane.

Soit f le flux que les sources envoient vers la surface, F le flux *total* atteignant cette surface, F' le flux sortant de cette surface, S l'aire gauche de la surface, Σ l'aire plane limitée par la courbe qui limite la surface, ρ son facteur de réflexion. Pour qu'il y ait équilibre, il faut que le flux absorbé, augmenté du flux réfléchi vers l'extérieur, soit égal au flux émis par les sources

$$(1 - \rho)F + F' = f. \quad (15)$$

Afin de poursuivre les calculs, nous supposons : a) que la surface réfléchit suivant la loi de Lambert ; b) que l'éclairement total E , sur cette surface, est uniforme. Sa brillance est alors

$$B = \frac{\rho E}{\pi} = \frac{\rho F}{\pi S}.$$

La surface creuse S produit, en tous points de l'espace (en dehors de la zone comprise entre Σ et S), le même effet qu'une surface plane Σ de même brillance. Le flux F' est donc donné par la formule

$$F' = \pi B \Sigma = \rho \frac{\Sigma}{S} F.$$

Si nous remplaçons, dans l'équation [15], F' par la valeur trouvée, nous obtenons

$$(1 - \rho)F + \rho \frac{\Sigma}{S} F = f$$

$$F = \frac{f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (16)$$

$$F' = \frac{\rho \frac{\Sigma}{S} f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (17)$$

$$B = \frac{\rho}{\pi S} \frac{f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)}. \quad (18)$$

4° Surface translucide limitée par une courbe plane.

Un raisonnement analogue au précédent permet d'écrire, en conservant les mêmes notations et les mêmes hypothèses, et en ajoutant en outre F'' , le flux sortant à travers la paroi translucide

$$\alpha F + F' + F'' = f$$

$$\alpha F + \rho \frac{\Sigma}{S} F + \tau F = f$$

$$\alpha + \tau = 1 - \rho$$

$$F = \frac{f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (19)$$

$$F' = \frac{\rho \frac{\Sigma}{S} f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (20)$$

$$F'' = \frac{\tau f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (21)$$

$$B = \frac{\rho}{\pi S} \frac{f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (22)$$

$$B' = \frac{\tau}{\pi S} \frac{f}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (23)$$

5° Généralisation du problème.

Soit une surface opaque S de forme quelconque limitée par une courbe quelconque (plane ou gauche). Le flux F qui atteint les parois est proportionnel au flux f que des sources extérieures leur envoient. Soit ξ le facteur de proportionnalité, on a

$$F = \xi f.$$

Si la surface S était plane ou convexe, ξ serait égal à 1. Nous proposons d'appeler ξ , le *facteur de correction interne dû à la concavité de la surface*. De même le flux F' que cette surface réfléchit est proportionnel à f , et à ρ , on a

$$F' = \rho \xi' f$$

ξ' pouvant être désigné sous le nom de *facteur de correction externe dû à la concavité de la surface*. Le produit $\rho \xi'$ peut s'appeler le *rendement de la réflexion sur la surface* considérée.

Exprimons l'équilibre lumineux

$$f = (1 - \rho)F + F'$$

$$1 = (1 - \rho)\xi + \rho\xi'. \quad (24)$$

L'équation [24] permet de calculer ξ' quand on connaît ξ .

Dans le cas où la courbe limite est plane et où l'éclairement résultant est uniforme on trouve aisément les relations

$$\xi = \frac{1}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (25)$$

$$\xi' = \frac{\frac{\Sigma}{S}}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \quad (26)$$

$$\frac{\xi}{\xi'} = \frac{S}{\Sigma}$$

qui vérifient bien les équations [16], [17] et [24].

Considérons maintenant deux surfaces opaques S_1 et S_2 , et soient :
 f_1 et f_2 les flux envoyés à l'intérieur de ces surfaces par des sources extérieures,

F_1 et F_2 les flux totaux reçus par chacune de ces surfaces,

F'_1 et F'_2 les flux totaux réfléchis,

F_1^2 et F_2^1 le flux envoyé par la première surface dans la deuxième et le flux envoyé par la deuxième surface dans la première,

ρ_1 et ρ_2 les facteurs de réflexion des surfaces,

ξ_1 et ξ_2 les facteurs de correction interne dus à la concavité des surfaces.

Les flux f_1 et F_2^1 jouent exactement le même rôle par rapport à S_1 (il en est de même de f_2 et F_1^2 par rapport à S_2), on peut donc écrire

$$F_1 = \xi_1(f_1 + F_2^1),$$

$$F_2 = \xi_2(f_2 + F_1^2).$$

Mais F_2^1 est évidemment proportionnel à F_2 de même F_1^2 est proportionnel à F_1 . Soient λ_2 et λ_1 , ces facteurs de proportionnalité, on a

$$F_1 = \xi_1 f_1 + \xi_1 \lambda_2 F_2,$$

$$F_2 = \xi_2 f_2 + \xi_2 \lambda_1 F_1,$$

d'où l'on tire

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= k_1 f_1 + k_2^1 f_2, \\ F_2 &= k_2 f_2 + k_1^1 f_1, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

avec

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{\xi_1}{1 - \xi_1 \xi_2 \lambda_1 \lambda_2}, & k_2 &= \frac{\xi_2}{1 - \xi_1 \xi_2 \lambda_1 \lambda_2}, \\ k_2^1 &= \frac{\xi_1 \xi_2 \lambda_2}{1 - \xi_1 \xi_2 \lambda_1 \lambda_2}, & k_1^1 &= \frac{\xi_1 \xi_2 \lambda_1}{1 - \xi_1 \xi_2 \lambda_1 \lambda_2}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Le principe de réciprocité nous permet en outre d'écrire

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{S_1}{S_2}. \quad (29)$$

IV. — SURFACES DE BRILLANCE CONSTANTE.

Nous avons déjà donné diverses méthodes de calcul de surfaces de

brillance constante ⁽¹⁾. Nous allons présenter ici une autre solution du même problème.

Supposons qu'on se donne la surface S limitée par la courbe L (fig. 10) et la brillance uniforme B que nous désirons obtenir. Soit AN la normale à la surface en un point A .

L'éclairement total de la surface est la somme de l'éclairement direct produit par la ou les sources et de l'éclairement diffusé produit par l'ensemble de la surface. Cet éclairement total est constant et égal à

$$E = \pi \rho B,$$

ρ étant le facteur de réflexion de la surface. Nous pouvons donc tracer

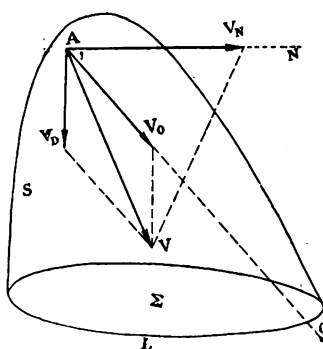


Fig. 10.

immédiatement la composante V_N suivant la direction AN du vecteur éclairement total.

D'autre part, en appliquant une des méthodes exposées au chapitre II, nous pouvons déterminer le vecteur éclairement V_0 correspondant à la lumière diffusée par la surface.

Pour aller plus loin, il est nécessaire de préciser la nature des sources éclairantes. Traitons le cas d'une source ponctuelle placée en O . La direction du vecteur V_0 correspondant à l'éclairement direct est alors imposée. L'extrémité du vecteur V est alors la trace de la parallèle à AO menée de l'extrémité du vecteur V_0 sur le plan normal à AN et passant par l'extrémité du vecteur V_N . On en déduit facilement la valeur de V_0 .

(1) P. WAGUET et J. DOURGNON, Remarques sur les surfaces réfléchissantes mates de brillance uniforme. *Lux*, mars 1929. P. WAGUET et J. DOURGNON, Nouvelles remarques sur les surfaces réfléchissantes mates de brillance uniforme. *Lux*, septembre 1929.

L'intensité de la source dans la direction OA devra donc être égale à

$$I = r^2 V_0$$

en posant

$$r = \overline{OA}.$$

Si, au lieu de connaître la brillance on connaît le flux lumineux émis par la source dans la direction de la surface, il est facile de ramener ce nouveau problème au précédent dans le cas où la courbe L est plane, en faisant usage de la formule [18].

Dans le cas où l'on fait usage de miroirs ou d'optiques pour corriger la répartition lumineuse de la source primaire, on ne peut pas toujours parler d'intensité du système source - appareil correcteur, même si l'on se trouve à une distance suffisante pour que ce système puisse être considéré comme ponctuel, mais on peut presque toujours parler du vecteur éclairement V_0 .

La théorie précédente ne s'applique évidemment qu'au cas où les vecteurs éclairement ont une signification, c'est-à-dire quand la surface S est concave et n'est rencontrée qu'une fois par les rayons lumineux émanant de la source. Il est pourtant possible de généraliser en convenant de ne faire entrer dans le calcul du vecteur V_0 , que la portion de la surface se trouvant du même côté du plan tangent et de considérer le vecteur V_0 comme identiquement nul quand le rayon a déjà traversé une fois la surface. Dans ce dernier cas, la forme de la surface qui se trouve privée de flux direct, doit être parfaitement déterminée.

V. — CALCUL DES FLUX ET DES ÉCLAIREMENTS MOYENS

(Facteur d'utilisation d'un espace clos).

Le calcul des éclairements moyens (ou, ce qui revient au même, des flux utiles) peut être effectué à l'aide d'une des méthodes présentées par MM. COHU, GOUFFÉ ou WETZEL, quand il s'agit d'éclairage direct par des sources qu'on peut considérer comme ponctuelles. Dans le cas général, où la lumière rencontre de larges surfaces diffusantes, le problème *théorique* se complique considérablement, bien qu'en *pratique*, grâce à des tableaux établis au préalable, ou grâce au calcul nomographique, il soit généralement possible de déterminer très rapidement les éclairements moyens, avec une approximation suffisante.

Il convient d'abord de mentionner la très ingénieuse méthode de MM. Ward HARRISON et Earl ANDERSON qui a été, jusqu'à présent, la

plus employée pour les espaces clos ⁽¹⁾. Cette méthode, basée sur un grand nombre de résultats expérimentaux, n'est pas une application des théories précédentes. Nous ne la citons que pour mémoire.

Mais il est possible, moyennant certaines hypothèses, de soumettre le problème à un calcul rigoureux. C'est dans le double but de généraliser le calcul au cas où la méthode précédente ne pouvait s'appliquer (appareils très concentrants par exemple) et de permettre un contrôle des résultats jusqu'ici obtenus, qu'une nouvelle méthode a été imaginée.

Considérons (fig. 9) un local parallélépipédique. Il est possible de connaître les flux f_u , f_p , f_m envoyés directement par une source sur le plan utile, sur le plafond et sur les murs ⁽²⁾. (Dans le cas de la figure, nous prendrons le plan ABCD comme plan utile). On peut faire, pour cela, usage de faisceaux de courbes établies à l'avance pour chaque appareil et qui donnent les flux envoyés dans des surfaces rectangulaires en fonction des dimensions de ces surfaces.

Pour tenir compte des réflexions entre les murs et le plafond, on admet que les parois sont uniformément éclairées et réfléchissent suivant la loi de Lambert.

Le plan utile est alors supposé matérialisé et parfaitement absorbant.

En généralisant quelque peu le raisonnement qui nous a conduit aux équations [27], on démontre que le flux utile total F_u est une fonction linéaire des flux f_u , f_p et f_m . On a

$$F_u = f_u + K_p f_p + K_m f_m. \quad (30)$$

Les facteurs K_p et K_m sont fonction des dimensions du local et des facteurs de réflexion ρ_p et ρ_m du plafond et des murs. Ils se déterminent d'ailleurs très aisément quand on connaît le rapport λ ⁽³⁾ du flux que le plafond envoie dans les murs par le flux total que le plafond rayonne.

L'expression de λ est un peu laborieuse à obtenir bien que les opérations qu'on ait à effectuer soient parfaitement classiques et élémentaires. Le procédé qui nous a paru le plus rapide consiste à partir de

(1) Merry Conte et Jean Dourgnon, Le coefficient d'utilisation d'un espace clos et sa prédétermination dans les projets d'éclairage, *Revue Générale de l'Électricité*, 2 avril 1927, tome XXI, page 531.

(2) Nous rappelons les notions fondamentales. Dans la méthode classique on considère le *flux utile* qui est le flux reçu par un plan horizontal fictif ou matérialisé, ce plan est dit *plan utile*. C'est par exemple dans un bureau le plan des tables de travail prolongé jusqu'à sa rencontre avec les murs. Le facteur d'utilisation est alors le quotient du flux utile par le flux total émis par les sources.

(3) Dans le mémoire le facteur était désigné par la lettre η .

la formule de HIGBIE et LEVIN, dont nous avons rappelé plus haut une démonstration particulièrement simple.

Quoi qu'il en soit, il a été possible à M. MARGOULIS d'appliquer à la méthode le calcul nomographique, grâce à son système d'abaque à transparent orienté ⁽¹⁾. Les calculs sont ainsi rendus très aisés. Ils sont tout au moins aussi rapides que l'expérimentation ⁽²⁾.

Tous ces calculs n'ont d'ailleurs pas été effectués dans un but purement théorique; ils doivent servir de base à une étude systématique actuellement en cours qui, nous l'espérons, sera susceptible d'apporter quelques clartés aux questions traitées encore avec un certain empirisme.

VI. — APPLICATIONS PRATIQUES DIVERSES.

En dehors de la détermination des facteurs d'utilisation, les théories que nous venons d'exposer sont susceptibles d'un grand nombre d'applications à la pratique. Citons-en quelques-unes.

a) *Plafonds lumineux.*

Certains éclairages indirects spéciaux étaient, jusqu'à présent, livrés à l'empirisme le plus complet. Les résultats auxquels conduisait ce manque de méthode étaient souvent désastreux. Nous allons voir qu'il est souvent possible de soumettre ces problèmes au calcul et que la méthode est généralement extrêmement simple.

Soit S la surface d'une coupole lumineuse diffusante par réflexion, de facteur de réflexion ρ , surmontant un local dont la surface est Σ .

On cherche généralement à obtenir une brillance uniforme de la coupole. Supposons qu'il en soit ainsi et soit F le flux total que les sources envoient sur cette coupole, le flux F' qui en sortira sera donné par la formule [17]. Pour avoir le flux utile, il suffira de chercher le facteur d'utilisation correspondant au local parallélépipédique qu'on obtiendrait en supprimant la coupole et en fixant au nouveau plafond fictif des luminaires ayant la courbe de répartition corres-

(1) W. MARGOULIS. Etude nomographique pour la détermination des coefficients d'utilisation dans les projets d'éclairage. *Revue Générale de l'Electricité*, 22 septembre 1928, tome XXIV, page 439.

(2) Les facteurs d'utilisation correspondant à l'appareil désigné sous le numéro 6 bis (type concentrant) ont été déterminés par M. MARGOULIS au moyen de son abaque (Voir la brochure *Projets d'Eclairage de la Société pour le Perfectionnement de l'Eclairage*, deuxième édition).

pondant à la loi de Lambert. Il serait encore plus rapide et beaucoup plus exact de déterminer, au moyen de l'abaque de M. MARCOULIS, la valeur du facteur λ correspondant. Nous aurons alors un flux utile F_u donné par la formule

$$F_u = \eta \lambda \frac{\rho \frac{\Sigma}{S}}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} f = \eta \rho \lambda' f,$$

un facteur d'utilisation

$$U = \frac{F_u}{f} = \eta \rho \lambda', \quad (31)$$

η étant le rendement des appareils utilisés.

Comme on le voit, le calcul *rigoureux* demande au plus cinq minutes.

La détermination des caractéristiques de l'installation nécessaire pour obtenir une brillance constante est un peu plus délicate.

Nous avons vu que, si l'on se donne la surface à éclairer et sa brillance, il est possible de déterminer la répartition lumineuse d'une source ponctuelle de position également donnée qui réalise la brillance uniforme désirée ⁽¹⁾.

Le problème inverse, dans lequel on cherche à déterminer la forme de la surface, connaissant la répartition des intensités de la source, est plus difficile à résoudre. On peut pourtant y arriver dans un certain nombre de cas particuliers.

Il convient, d'ailleurs, de remarquer que ce problème ne nécessite pas une solution mathématique absolument rigoureuse, car ce qu'on désire, ce n'est pas tant d'avoir effectivement une brillance uniforme, que de donner la sensation que cette brillance est uniforme.

Le problème devient alors du domaine de l'optique physiologique, qui doit toujours être à la base de toute étude sérieuse sur l'éclairage.

b) Globes diffuseurs.

La formule [43] permet d'obtenir immédiatement le rendement η d'une enveloppe translucide, convexe, fermée, homogène et d'épaisseur constante ⁽²⁾.

(1) Malgré l'aspect assez ardu des formules, les calculs sont généralement relativement simples, car on trouve dans un certain nombre de mémoires des courbes ou des tableaux sur lesquels on peut relever les valeurs de la plupart des grandeurs intervenant dans les dits calculs.

(2) Cette formule a été donnée pour la première fois à notre connaissance par M. N.-A. HALBERTSMA, *Lichttechnische Studien*, Leipzig, 1916. Mais la démonstration donnée par M. HALBERTSMA suppose une enveloppe sphérique, notre démonstration est, comme on l'a vu, beaucoup plus générale.

$$\eta = \frac{F'}{f} = \frac{\tau}{1 - \rho}. \quad (32)$$

Cette formule suppose, en outre, essentiellement que ρ et τ sont indépendants de la direction des rayons incidents. Pour pouvoir l'appliquer au cas des diffuseurs fermés, il est nécessaire d'introduire certaines corrections qu'on trouvera dans une étude que nous avons publiée dernièrement (1).

La brillance moyenne d'un diffuseur fermé dont la surface externe rayonne suivant la loi de Lambert, est

$$B = \frac{\eta f}{\pi S}, \quad (33)$$

S étant l'aire totale de l'enveloppe.

Une hypothèse simple permet en outre d'obtenir, avec une approximation suffisante, la répartition réelle des brillances ainsi que la courbe photométrique approximative.

c) Réflecteurs diffusants (2).

Soit f le flux total émis par la source, f' le flux envoyé dans le réflecteur et F' le flux réfléchi vers l'extérieur par le réflecteur.

Le rendement du réflecteur est

$$\eta = \frac{f - f'}{f} + \frac{F'}{f}. \quad (34)$$

Soit ρ_z' le rendement de la réflexion de la surface du réflecteur, nous avons

$$\eta = \frac{f - f'}{f} + \rho_z' \frac{f'}{f} = 1 - \frac{f'}{f} + \rho_z' \frac{f'}{f}. \quad (35)$$

Si le réflecteur est limité par une courbe plane et si l'on suppose qu'il est uniformément éclairé, on a en appliquant la formule [26],

$$\eta = 1 - \frac{f'}{f} + \frac{\rho \frac{\Sigma}{S}}{1 - \rho \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right)} \frac{f'}{f}. \quad (36)$$

Dans le cas des réflecteurs en tôle émaillée, il est nécessaire de tenir compte de la réflexion régulière. Soit alors ρ , le facteur de réflexion diffuse et ρ' le facteur de réflexion régulière. On a, en admettant que la

(1) J. DOURGNON et P. WAGUET, Les diffuseurs de lumière. *Revue Générale de l'Electricité*, 23 mars 1929, tome XXV, page 435.

(2) Jean DOURGNON, Etude sur quelques dispositifs d'éclairage. *Revue Générale de l'Electricité*, 7 avril 1928, tome XXIII, page 609.

lumière réfléchie régulièrement n'atteigne qu'une seule fois la paroi du réflecteur

$$\eta = 1 - \frac{f'}{f} + \rho \xi' \frac{f'}{f} + \rho' \frac{f'}{f} ; \quad (37)$$

et en conservant les hypothèses faites plus haut

$$\eta = 1 - \frac{f'}{f} + \left[\frac{\rho \frac{\Sigma}{S}}{1 - \left(1 - \frac{\Sigma}{S}\right) \rho} + \rho' \right] \frac{f'}{f} . \quad (38)$$

Ces formules ne tiennent pas compte du flux perdu dans la cheminée de l'appareil, mais il est facile de faire intervenir cette correction.

BUCKLEY et GRIEVESON (1) ont donné une formule dans laquelle interviennent les intensités moyennes, formule qu'il est très facile d'obtenir en partant des considérations précédentes.

(1) H. BUCKLEY et C.-I.-W. GRIEVESON, Light distribution from industrial reflector fitting. Londres 1936.

REDRESSEURS A ANODE COLLOÏDALE ⁽¹⁾

par M. ANDRÉ.

Ingénieur à la Société anonyme La Radiotechnique.

Introduction. — Eléments d'un redresseur à anode colloïdale. — Constitution du redresseur; étude critique des modèles successifs. — Alimentation du redresseur. — Applications : à la T.S.F.; à l'automobile; applications diverses.

INTRODUCTION.

Au début de 1923, ayant observé accidentellement les remarquables propriétés rectificatrices du contact d'un conducteur métallique avec un métal divisé jusqu'à l'état colloïdal et imprégné d'acide sulfurique concentré, j'ai rapidement rassemblé les éléments aptes à la réalisation d'un redresseur de courant fonctionnant d'une façon satisfaisante.

En novembre 1925, j'ai présenté cet appareil à la Société des Amis de la T. S. F. mais, à cette époque, la nouveauté et le caractère intime des phénomènes utilisés laissaient subsister tant de lacunes que, malgré une expérimentation d'apparence satisfaisante, les valves fabriquées n'avaient pas un fonctionnement certain, ni durable.

Pendant deux années cette incertitude se perpétua, étant donné la complexité des causes de troubles et ce n'est qu'à partir de la fin de 1927, les moyens d'investigations étant devenus suffisants, que la technique put être solidement établie et que la qualité du fonctionnement devint un fait acquis.

Actuellement, le recoupement fréquent des résultats positifs de cette mise au point, permet de produire en quantité un redresseur robuste, stable et de longue vie. Sa présentation aux électriciens devient donc tout à fait opportune.

En effet, le redresseur à anode colloïdale sous la forme actuelle, est de tous les petits appareils statiques existants, celui dont le rendement est le plus élevé sous l'encombrement le plus réduit. Son prix de revient, grâce à un montage très simple et très mécanique, est des plus bas.

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre le Mercredi 23 octobre 1929.

Ayant déjà exposé en novembre 1925 (Communication publiée dans le journal *L'Onde Electrique*), les propriétés physiques des électrodes colloïdales, je me bornerai à décrire ici le dernier modèle de valve construit par la Société « La Radiotechnique » de Suresnes, et à montrer en quoi elle diffère des premiers modèles établis.

Je me propose, ensuite, d'indiquer le mode d'action de ce redresseur sur le courant alternatif, qui est commun à la plupart des redresseurs chimiques, et les conséquences de ce mode d'action sur la détermination des caractéristiques du matériel d'alimentation et des circuits.

Enfin, après avoir succinctement signalé quelques applications de la valve à anode colloïdale, je terminerai par un examen rapide de la possibilité d'augmenter la puissance d'action des redresseurs à contact solide et le sens dans lequel cette étude me paraît devoir être poursuivie.

ELÉMENTS D'UN REDRESSEUR A ANODE COLLOÏDALE.

En principe, le redresseur à anode colloïdale est assimilable aux redresseurs à contacts solides, dont un des premiers types brevetés est celui de Frantz Pawlowski (Sulfure de cuivre-aluminium).

Il en diffère essentiellement par l'état finement divisé de l'une de ses électrodes et par la présence d'un corps régulateur de la composition chimique des substances en contact.

L'anode est en argent colloïdal, mais en réalité la couche en contact avec la cathode est transformée en sulfure d'argent stable au cours du fonctionnement, grâce à la présence d'acide sulfurique concentré

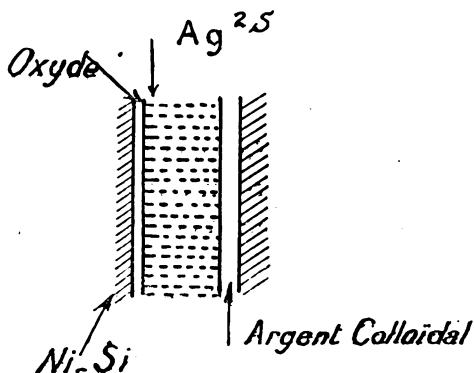


Fig. 1.

qui imprègne la masse d'argent aggloméré et à l'échauffement local de la région du contact, par les myriades d'étincelles de commutation qui y éclatent (fig. 1).

La cathode, en alliage de nickel et de silicium, résiste parfaitement à l'attaque de l'acide. Son oxyde, très résistant mécaniquement, constitue une couche d'épaisseur négligeable, probablement monomoléculaire. Il est entretenu, même au repos, par la présence de l'acide concentré. Cette propriété d'inattaquabilité de la cathode est absolument indispensable. Il est à noter que la concentration de l'acide diminuant, l'attaque apparaît progressivement. Il résulte de ceci qu'il faut absolument éviter la dilution par la vapeur d'eau atmosphérique et, par conséquent, enfermer rigoureusement le redresseur. Par contre, des gaz pouvant se dégager au cours du fonctionnement, il y a lieu de prévoir une soupape de gaz sur l'enveloppe.

CONSTITUTION DU REDRESSEUR. — ÉTUDE CRITIQUE
DES MODÈLES DÉJÀ ÉTABLIS.

Dans les premiers modèles étudiés (1923), l'anode colloïdale était formée naturellement par le passage du courant dans le système argent — acide sulfurique — nickel. Les micelles se détachant de l'argent venaient combler l'espace argent-nickel et, après quelques minutes, à la conductibilité unilatérale électrolytique, accompagnée d'un dégagement gazeux, se substituait une conductibilité franche, shuntant l'électrolyte et amenant la cessation du dégagement gazeux.

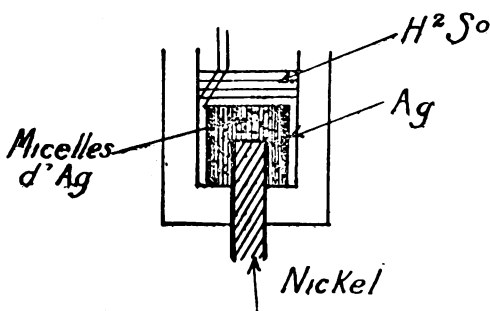


Fig. 2.

Ce système de formation présentait l'inconvénient grave de dégager des particules grossières parmi les micelles et de provoquer de fréquents courts-circuits.

En outre, la cathode s'attaquait lentement, et d'autant mieux que l'acide absorbait de l'eau atmosphérique par le bouchage insuffisant.

Il se produisait également dans ce modèle des fuites d'acide, malgré un système de bouchage inversable.

A la cathode de nickel vint se substituer (1925), une électrode en ferro-nickel, en vue de fabriquer des cellules en verre et d'augmenter la résistance à l'attaque de l'acide. L'anode formée naturellement fut remplacée par une masse d'argent colloïdal, préparée d'avance par voie chimique.

L'impureté des ferro-nickels conduisit à multiplier les éléments cathodiques, et cette électrode fut constituée par 7 fils en parallèle, munis chacun d'un fusible (Modèle 1926).

Dans ces valves, les difficultés de verrerie, l'attaque lente des cathodes et l'absorption d'eau provoquaient encore de trop nombreux accidents, principalement des courts-circuits.

A cette époque, il apparaissait déjà que l'utilisation de cathodes inattaquables devait augmenter considérablement la sécurité du redresseur, mais il n'y avait aucune possibilité pratique d'obtenir en France des alliages parfaitement résistants aux acides concentrés sous la forme de petites électrodes fondues. Les ferro-siliciums, que seuls, on pouvait se procurer, ne pouvaient être coulés avec un diamètre assez faible et, de plus, leur homogénéité laissait à désirer pour notre application précise. C'est avec l'appui d'une Compagnie américaine, la « Raytheon MFG Co », que j'ai pu entreprendre l'étude systématique des alliages cathodiques résistants aux acides concentrés et en particulier celle des silico-alliages, dont les propriétés sont remarquables.

Cette étude conduisit à l'obtention d'un redresseur simple à cathode unique, constitué par une enveloppe métallique argentée, renfermant la masse colloïdale d'argent.

La cathode de ce type (1927), était maintenue dans la masse colloïdale par un système de bouchage à peu près étanche. Toutefois, il se produisait une rentrée de vapeur d'eau importante et l'action précise de la cathode de nickel-silicium était masquée par une électrolyse croissante.

De nouvelles observations faites aux Etats-Unis sur les valves Raytheon décelèrent une augmentation journalière de poids, de l'ordre du milligramme et d'autant plus marquée que le bouchage était moins étanche. Cette augmentation de poids atteignait parfois 10 milligrammes par jour.

Détail assez curieux, avec un bouchage moins étanche que celui de nos valves, celles des Américains gardaient plus longtemps la concentration de leur acide.

Ce fait était dû à la présence du tube de fer non protégé, qui, pour la moindre dilution, était attaqué jusqu'à ce que la concentration de

l'acide soit rétablie. Finalement, on se trouvait toujours en présence d'acide concentré et de sulfate de fer cristallisé avec l'eau absorbée. A l'examen, les valves américaines perdaient leur acide en se desséchant, alors que les nôtres s'humidifiaient et se remplissaient d'eau acidulée.

La fermeture de la valve devenant de plus en plus étanche, afin d'éviter l'entrée d'eau, il se produisit alors une compression interne au cours du fonctionnement, puis un déplacement de la cathode, solidaire du bouchon.

Le mode d'assemblage était alors insuffisant pour que le problème de l'étanchéité soit résolu totalement.

Là, il convient de remarquer que la tendance énergique de l'acide à se diluer en abaissant la tension de vapeur ambiante, nécessite des précautions analogues à celles dont on s'entoure pour maintenir le vide dans les lampes à incandescence. C'est ce qui a été réalisé dans le dernier modèle, de conception totalement différente de celle des appareils antérieurs (type 1928) (fig. 5).

La cathode, oxydée à l'avance par voie électrolytique, est fixée mécaniquement au fond d'un tube métallique au moyen d'une bague et en est isolée au moyen de rondelles de mica bakélisé et cuit.

Le tube métallique contient l'anode colloïdale, de façon telle qu'aucun déplacement relatif des électrodes n'est à redouter. L'anode est recouverte de silice pulvérulente, dont le rôle est de maintenir en réserve une certaine quantité d'acide immobilisée.

Le bouchage du tube est effectué au moyen de rondelles d'amiante enduites de paraffine et de bakélite, isolées de l'aggloméré par une bague de verre, afin d'éviter la migration de l'acide sur le bouchon, par capillarité. Le résultat pratique est d'ailleurs complètement atteint.

Si, au cours du fonctionnement, la pression intérieure s'élève, les gaz peuvent traverser les joints qui sont susceptibles, à chaud, d'être traversés. Au refroidissement, la paraffine maintenue capillairement par l'amiante reconstitue l'écran étanche. Les rondelles bakélisées assurent principalement la tenue mécanique du bouchon, leur étanchéité n'étant pas parfaite.

Ce système de bouchage a donné, sur des valves essayées au Laboratoire central d'électricité, la preuve de son efficacité, les essais d'endurance, échelonnés sur 8 mois, ayant permis 1 440 heures de service intermittent, sur 6 chargeurs, dont 3 sous 4 volts et 3 sous 6 volts. Les valves ayant d'ailleurs conservé leurs caractéristiques électriques après ces épreuves.

Malgré son efficacité, ce système de bouchage a été complété par

enveloppement d'un tube métallique surmonté d'un clapet mécanique qui empêche l'air de rentrer autour du redresseur, limitant ainsi la valeur d'eau à la quantité occluse au cours du montage.

L'étanchéité de l'enveloppe est contrôlée à la pression sous l'alcool. Le clapet est constitué par un bouchon en bakélite moulée sur le tube. Ce bouchon est percé d'un petit trou qui est obturé par une pastille de caoutchouc, poussée par un ressort.

Dans ces conditions, la chaleur dégagée par le redresseur ne se transmet pas au caoutchouc par conductibilité du métal, et la pastille peut conserver indéfiniment une plasticité suffisante.

Il est à noter, d'ailleurs, que le redresseur n'absorbant pas d'eau, il ne dégage pas de gaz, et que les précautions précédentes ne jouent un rôle qu'accidentellement.

La valve est montée sur un culot Edison dont le joint est obtenu par soudure et qui, de plus, est rempli d'un compound à base de brai de gaz. L'ensemble monté est contrôlé à la pression comme il a été dit plus haut.

ALIMENTATION DU REDRESSEUR A ANODE COLLOÏDALE.

Le mode d'utilisation du redresseur à anode colloïdale influe considérablement sur son fonctionnement et sa durée.

En effet, le conducteur unilatéral, comme la plupart des appareils présentant une légère inertie, ou nécessitant l'action d'un renversement partiel du courant, détermine une rupture un peu après l'inversion de la force électro-motrice alternative, au lieu d'ouvrir le circuit au passage à zéro, comme le font les valves électroniques.

Il s'ensuit une oscillation brusque d'amplitude considérable, amortie d'ailleurs très rapidement. Cette oscillation dépend en grandeur de l'inductivité du circuit d'alimentation, et l'on peut d'ailleurs assimiler ce système électrique à celui d'un dispositif de rupture de bobine d'induction.

L'étude de ces pointes de tension consécutives à la rupture brusque est rendue facile par l'oscillographe, mais, pratiquement, on peut constituer un voltmètre apte à fixer la valeur des pointes ou « Peak Voltmeter », imaginé par le Dr Busu du M. I. T. et réalisé de diverses manières, selon les besoins des mesures.

Le voltmètre de pointe (Peak voltmeter) est constitué par une valve thermoionique redressant l'oscillation, de façon à permettre la charge

d'une petite capacité, dont la tension aux bornes est, naturellement, la valeur maximum des pointes appliquées.

En série avec cette capacité, un potentiomètre permet d'annuler sa tension. Le système capacité-potentiomètre est injecté dans l'espace

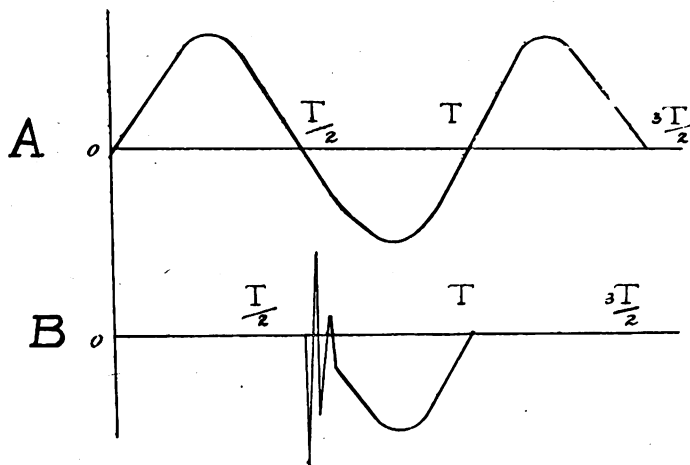


Fig. 3.

filament-grille d'un triode. On mesure le courant-plaque pour un potentiel de grille nul, puis on insère la capacité chargée qui modifie le courant anodique. Avec le potentiomètre, on ramène à zéro le potentiel de grille, ce qui s'enregistre par la valeur du courant-plaque, puis on

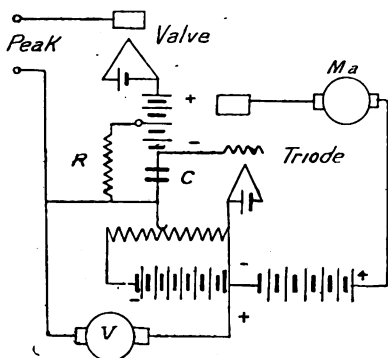


Fig. 4.

lit au voltmètre la tension qu'il a fallu ajouter potentiométriquement pour combattre celle du condensateur.

On constate avec cet appareil que la valeur de la tension de pointe (peak voltage) atteint facilement le double de la tension inverse, calculée ou mesurée dynamiquement.

C'est ainsi que l'emploi de transformateurs à fuites provoque une tension inverse instantanée prohibitive. Dans un circuit de charge sous 4 volts, il suffit de séparer sur 2 jambes les enroulements primaire et secondaire pour voir la tension de pointe (peak) passer de 16 à 32 volts, la tension efficace secondaire étant de l'ordre de 7,5 volts dans les deux cas, et le débit maintenu le même par une résistance variable.

Les transformateurs à enroulements juxtaposés, tels que la plupart des petits appareils blindés, accroissent la tension de pointe de 20 à 50 pour cent de la valeur calculée.

Au contraire, la superposition des bobinages qui diminue les fuites

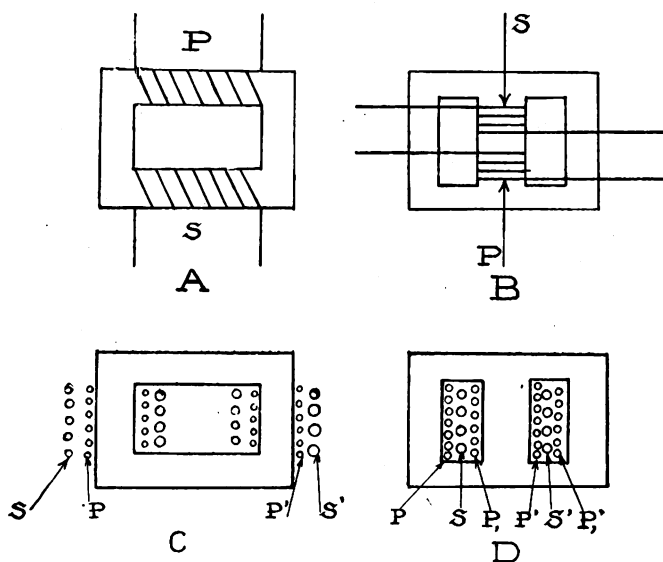


Fig. 5.

magnétiques, est seule à adopter. La meilleure disposition est celle en sandwich, secondaire entouré du primaire, intérieurement et extérieurement.

De même, il est préférable, à ce point de vue d'utiliser des tôles médiocres à grande consommation, quitte à altérer un peu le rendement de l'ensemble à l'origine, cette altération se trouvant compensée par la suite par une meilleure conservation du redresseur.

On voit, également, au voltmètre de pointe, que le montage du redresseur sur un potentiomètre, ou l'alimentation du transformateur en série avec une résistance, élèvent la tension à égalité de courant débité.

L'oscillation due à la valve est d'autant plus ample que celle-ci est mieux établie, c'est-à-dire coupe plus rapidement. L'énergie inverse

est d'ailleurs plus petite, le temps d'oscillation étant plus court. C'est ainsi que les premiers modèles de redresseurs, dans lesquels la cathode émergeait de l'anode, coupaient moins franchement, parce qu'ils étaient shuntés par une région troublée, une sorte de résistance variable constituée par la surface cathodique non recouverte d'argent colloïdal.

Le dernier type, au contraire, provoque une pointe plus grande, mais si l'on respecte les conditions de construction du transformateur indiquées ci-dessus, sa valeur est inférieure à celle calculée.

La tension de pointe est un des gros obstacles du couplage en parallèle, car le mauvais fonctionnement d'un seul redresseur suffit à perturber tous les autres. Sur les bancs de formation, on est conduit à shunter les groupes de redresseurs par une résistance fixe. L'action des étincelles dues à une pointe excessive se traduit par un isolement progressif et rapide des électrodes, par suite d'explosions locales contre l'oxyde cathodique, qui repoussent l'anode de la surface cathodique d'une façon uniforme.

Il est nécessaire de prévoir une résistance fixe en série avec le système transformateur-valve-batterie, en vue d'amoindrir l'effet de self-inductance de la source. L'attrait du rendement avait conduit des constructeurs à supprimer cette résistance fixe et l'efficacité s'élevait à 60 pour cent. Malheureusement, la tension de pointe atteignait 32 à 34 volts, alors qu'un ohm de résistance ramenait cette valeur à 22 volts, la tension secondaire étant, de plus, élevée de 2 volts. La résistance offre, en outre, l'avantage d'une régulation, alors que les appareils précités variaient de 1 à 4 ampères dans les cas extrêmes, avec une résistance à coefficient de température positif élevé, on ne trouve que des écarts négligeables de l'ordre de 20 pour cent. Le rendement s'abaisse alors au voisinage de 35 à 40 pour cent.

Quant à la tension maximum pouvant être supportée par le redresseur à cathode de nickel-silicium, elle varie considérablement avec la forme de la courbe dans le temps.

Si l'on applique lentement et progressivement une tension continue, la cathode peut supporter jusqu'à 100 volts, avec un courant inverse de l'ordre du milliampère. En appliquant brusquement cette tension, il faut en réduire la valeur entre 30 et 40 volts, ce qui revient à admettre comme valeur pratique et sûre de la tension de pointe 25 volts.

La résistance directe de la cellule est de l'ordre du $1/100^{\circ}$ d'ohm, la valeur inverse est d'environ 100 000 ohms, ce qui établit le rapport de

1 à 10 millions entre les deux résistances. Pratiquement, il est inutile de dépasser cette variation.

Comme je l'ai fait remarquer dans ma communication de 1925, le montage de Grätz est le plus intéressant au point de vue de l'utilisa-

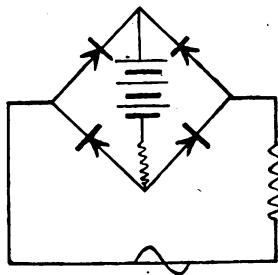


Fig. 6.

tion, car il permet d'élever la tension utile au voisinage de la tension inverse, les redresseurs n'ayant à supporter que la différence de potentiel aux bornes de la batterie.

Toutefois, il est nécessaire, pour la marche à vide, de grouper des valves susceptibles de se répartir la tension inverse, car, dans le cas contraire, toute la tension du transformateur serait appliquée à une seule valve et le maximum atteint au moins 25 volts pour la recharge de 6 éléments.

Le rendement du groupe de valves est compris entre 75 et 80 pour cent.

APPLICATIONS DU REDRESSEUR A ANODE COLLOÏDALE.

1° *A la T. S. F.* — La recharge des accumulateurs de chauffage est rendue extrêmement économique par suite du prix du rendement et de la durée de ce redresseur. Les Américains ont établi des batteries comportant un transformateur noyé dans le bac et la valve, facilement interchangeable. Ce dernier point de vue devient secondaire dans le cas de faibles capacités, puisque le nombre d'ampère-heures pouvant être véhiculés par le redresseur du petit modèle est de l'ordre de 2 500 à 3 000.

Les petites batteries pouvant fournir de 100 à 150 décharges, la vie d'une valve est de l'ordre de celle d'un accumulateur d'une vingtaine d'ampère-heures.

La recharge pendant l'audition provoque, en raison des oscillations mentionnées précédemment, des perturbations importantes d'accord

et des crépitements. On annule presque totalement ces troubles en shuntant la valve par une capacité de l'ordre du microfarad, et en écouant la haute fréquence à la terre avec une autre du même ordre.

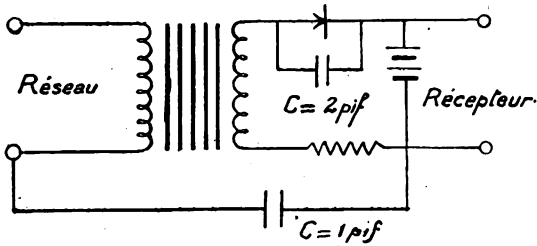


Fig. 7.

Les récepteurs très sélectifs sont d'ailleurs, assez peu sensibles à ces parasites.

On peut, également, combattre la tension de pointe par les moyens classiques employés pour réduire l'énergie de self-inductance dans les appareils à rupture brusque, par exemple en shuntant l'enroulement secondaire par une résistance, en logeant sur le bobinage une spire en court-circuit.

Un procédé assez satisfaisant malgré son coût un peu élevé, con-

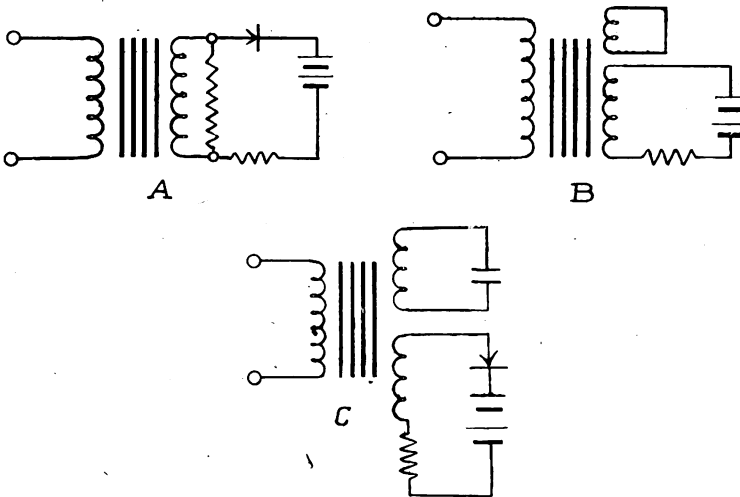


Fig. 8.

siste à ajouter un enroulement à haute tension sur le transformateur et à le faire débiter sur une capacité.

Il y a lieu, si l'on alimente directement le récepteur par le réseau, de prendre des précautions par un filtrage sérieux contre l'arrivée des

parasites par les conducteurs. Il sort du cadre de cette communication d'entreprendre l'étude traitée tant de fois dans les ouvrages relatifs à la réception sans fil.

2° *A l'automobile.* — Les batteries d'éclairage et de démarrage des automobiles possédant 3 et 6 éléments, leur capacité, de l'ordre de 40 à 100 ampère-heures, permet sans dommage un régime de 4 ampères, qui est obtenu par un type de redresseur à 4 éléments (montage de Grätz).

Le faible encombrement du matériel et sa robustesse permettent de l'installer au poste fixe sur le véhicule, de façon à le relier au réseau, sans accéder à la batterie à chaque recharge.

3° *Applications diverses.* — Enfin, outre l'utilisation de la valve à anode colloïdale comme redresseur pour la recharge de petites batteries, le dispositif à 4 éléments qui supporte une tension inverse limitée peut servir à l'électrolyse, à l'alimentation de petits électro-aimants, à l'excitation de petites machines en courant redressé, etc...

De plus, étant donné sa faible résistance directe et sa grande résistance inverse, cette valve est susceptible de servir d'interrupteur polarisé, par couple de conjoncteur-disjoncteur, pour la recharge des batteries par dynamos à régime de marche très varié (groupes électrogènes divers). Le conducteur unilatéral peut supporter un courant permanent de 10 à 12 ampères et une tension inverse de 30 volts sans débiter.

SUR LA POSSIBILITÉ D'AUGMENTER LA PUISSANCE D'ACTION DES REDRESSEURS A CONTACT.

Nous avons vu que le redresseur à anode colloïdale pouvait supporter une tension inverse allant jusqu'à 100 volts en continu. La question se pose de savoir pourquoi le système est aussi limité en tension lorsqu'il redresse le courant alternatif. Il convient, alors, d'observer que, dans le cas d'une tension continue appliquée graduellement, on prend la précaution d'attendre que le courant se réduise à une valeur négligeable et de cette façon on évite l'éclatement des étincelles sur la cathode.

Au contraire, en agissant sur le courant alternatif, il y a séparation brusque des électrodes traversées par un courant et création instantanée d'une perte notable dans un espace restreint, par extra-courant

de rupture avec un échauffement considérable, accompagnant des quantités d'étincelles.

La limite de tension admissible pour ces étincelles est la valeur de celle de l'arc (25 à 30 volts), au-dessus de laquelle le contact se détériore rapidement.

Le peu de matière engagée dans la rectification, son insuffisante résistance au bombardement ou sa régénération incomplète sont autant de facteurs limitatifs de la tension applicable.

Quant au courant, il ne se répartit pas uniformément sur la surface comme il a tendance à le faire dans un milieu plus mobile, par exemple, dans un électrolyte. En réalité, une petite surface réelle entre en travail, en parallèle avec d'autres, qui ne collectent qu'une partie du courant.

Après des centaines d'heures de fonctionnement, il y a échange de surfaces : celles entrées les premières en action deviennent plus résistantes et d'autres assurent le passage du courant ; il y a uniformisation du courant, dont la densité diminue, mais comme cet échange ne se fait qu'au prix de l'altération graduelle des électrodes, la capacité du redresseur reste sensiblement constante, au lieu d'augmenter.

En augmentant la surface des électrodes, on accroîtra leur durée dans une certaine limite. Il faudra, alors, augmenter la quantité d'acide dans le rapport convenable.

Les redresseurs secs sont soumis exactement aux mêmes difficultés, avec une limitation beaucoup plus grande du courant admissible, à cause de l'immobilité excessive de la matière et de la tension, à cause du faible pouvoir électrique des surfaces en contact.

Il semble donc très peu probable de voir augmenter la tension de polarisation et le pouvoir de transport d'intensité des redresseurs à contact solide, autrement qu'en présence d'une substance plus régénératrice de la composition des surfaces en présence, et c'est dans ce sens que les recherches se poursuivent actuellement.

PROTECTION DU SYNCHRONISME SUR LES TRANSMISSIONS RADIOTÉLÉGRAPHIQUES BAUDOT-VERDAN ⁽¹⁾

par M. Ch. BONNIN.

Rôle des parasites dans les transmissions radiotélégraphiques, par Baudot. — Elimination des parasites, par la méthode Verdan. — Signaux correcteurs — Principes du maintien du synchronisme des distributeurs Baudot. — Effet des parasites. — Principe du protecteur de correction. — Efficacité de son fonctionnement.

On sait que le système Baudot est applicable aux transmissions radiotélégraphiques. On sait également que la première et très importante difficulté que l'on rencontre lors de la mise en œuvre des transmissions radiotélégraphiques équipées au Baudot, provient de la présence toujours inopportune des parasites atmosphériques qu'il faut éliminer.

Les signaux Baudot sont composés de cinq éléments d'égale durée qui peuvent être des éléments de travail ou des éléments de repos. Ces signaux se distinguent les uns des autres par la manière dont les éléments de travail et de repos sont répartis dans les groupes de 5 unités qui les constituent.

Quand les signaux Baudot sont convertis en signaux radiotélégraphiques rayonnant autour de l'antenne émettrice, les éléments de travail correspondent à des émissions d'ondes entretenues et les éléments de repos à des coupures ou des arrêts d'émission de ces ondes.

S'il survient quelque parasite pendant la durée d'un élément de repos, il se substitue à cet élément qui devient un élément de travail supplémentaire. A la réception, si le signal altéré était traduit immédiatement, il donnerait lieu à une erreur.

Elimination de l'effet des parasites par la méthode Verdan.

C'est alors qu'intervient la méthode imaginée par M. VERDAN, sous-ingénieur à l'administration française des P. T. T.

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre le Vendredi 25 octobre 1939.

M. MONTORIOL nous a fait connaître ici même ce qu'est la méthode Verdan et comment elle permet l'élimination des parasites intercalés dans les signaux Baudot. Nous ne décrivons pas à nouveau cette méthode, qui concerne les signaux concourant à la formation des caractères, lettres, chiffres ou signes de ponctuation. Nous nous bornerons à dire qu'elle a donné d'excellents résultats et qu'elle constitue une solution complète de l'élimination des parasites. Elle donne automatiquement la traduction exacte des textes transmis.

Signaux correcteurs

Mais on sait aussi que le système Baudot ne transmet pas que des signaux constituant des caractères, il transmet également des signaux de correction nécessaires au maintien du synchronisme entre les appareils émetteurs et les appareils récepteurs.

Les signaux de correction comprennent seulement un élément de travail suivi immédiatement d'un élément de repos, ce dernier ne servant qu'à délimiter exactement la durée et la position de l'élément de travail. Ils peuvent être altérés par les parasites dont l'action équivaut à la suppression de l'élément de repos, ou, ce qui revient au même, à la prolongation intempestive de la durée de l'élément de travail.

L'action des signaux de correction est immédiate et ils ne se prêtent pas à l'application directe de la méthode Verdan. Il a fallu recourir à un procédé différent pour compléter cette méthode et l'étendre à la protection du synchronisme.

C'est ce procédé, étudié et réalisé en commun par M. VERDAN et les Ateliers J. CARPENTIER que nous exposons ci-après.

Principes du maintien du synchronisme.

Nous rappelons brièvement qu'une des bases fondamentales du système Baudot consiste à maintenir un synchronisme aussi approché que possible entre les commutateurs tournants appelés distributeurs qui répartissent à chacun des organes du poste les courants qui les actionnent.

Les distributeurs comprennent 6 couronnes concentriques conductrices montées sur un plateau isolant. (Voir fig. 1).

Les trois premières couronnes, en comptant à partir de l'extérieur, sont découpées en contacts séparés et les trois autres sont pleines. Les

couronnes découpées sont respectivement réunies aux trois autres par le jeu de trois paires de balais métalliques frotteurs qui mettent successivement chacun des contacts des couronnes découpées en relation avec la couronne pleine correspondante.

Les contacts de la première couronne sont connectés aux organes récepteurs. Un d'entre eux est le contact de correction qui est normalement relié à l'électro correcteur. Tous ces contacts sont mis en relation par les balais avec la 4^e couronne reliée au secondaire du relais récepteur.

Les contacts de la 3^e couronne sont connectés aux organes chargés

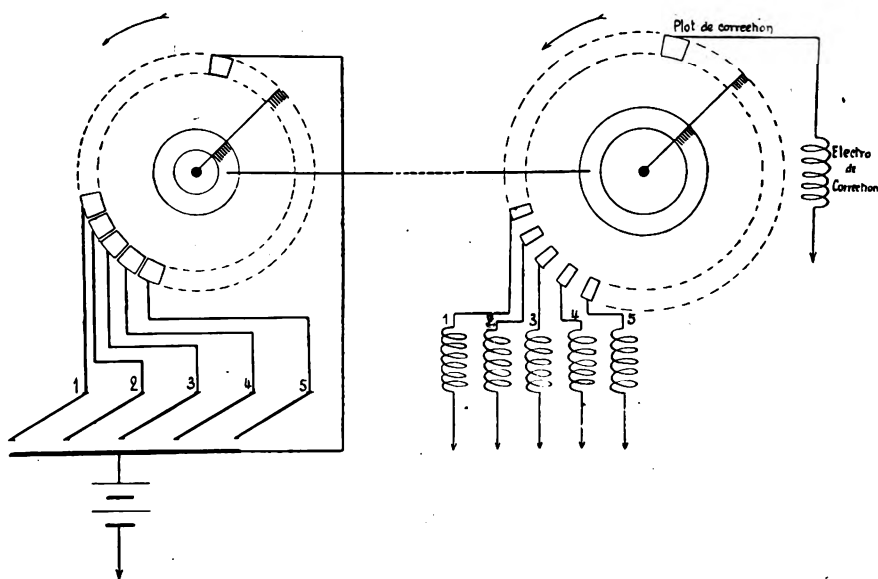


Fig. 1.

de fonctions mécaniques locales, ils sont mis successivement en relation par les balais avec la 6^e couronne connectée à une source locale de courant continu.

La 2^e et la 5^e couronnes n'intéressent pas les organes récepteurs.

L'obtention du synchronisme repose sur les principes suivants :

1° On régularise la vitesse des balais de chaque distributeur de manière à la rendre aussi constante que possible. On emploie à cet effet, le régulateur Baudot ou, de préférence, le diapason et le moteur phonique. En outre, on amène, par réglage, les vitesses des distributeurs communiquant entre eux à être très voisines l'une de l'autre, mais on maintient systématiquement entre elles une légère différence.

2° Le distributeur le plus lent (correcteur) émet des signaux de cor-

rection qui ont pour effet de retarder, par à-coups, les balais du distributeur corrigé et de leur faire perdre l'avance qu'ils tendent à prendre sur ceux du distributeur correcteur par suite de leur excès de vitesse.

Les signaux de correction sont envoyés à chaque tour, ils demeurent sans effet tant que l'élément de travail n'est pas recueilli par le plot spécial (plot de correction) du distributeur corrigé (Voir figure 1).

La différence de vitesse entre les deux distributeurs est assez faible pour que le signal tombe plusieurs fois (de 15 à 40 fois) sur chaque plot du distributeur qui le reçoit, mais, en fin de compte, il arrive toujours à être reçu sur le plot de correction qui, normalement doit le recevoir. A ce moment, la correction a lieu et les balais sont ramenés en arrière d'un angle ε .

Au tour suivant, la correction n'aura sûrement pas lieu, car le retard angulaire ε qui vient de se produire est plus grand que l'avance que peut prendre le balai pendant un tour. La correction aura lieu quelques tours plus tard (de 3 à 5 tours) et les balais subiront un nouveau recul.

Ainsi, l'orientation des balais du distributeur corrigé oscillera continuellement dans l'espace autour d'une orientation moyenne qui correspond à celle du distributeur correcteur. Il se produit un synchronisme approché à la valeur près d'un écart de correction ε égale à environ $1/10^\circ$ du contact du distributeur.

Cet écart a été choisi, naturellement, assez faible pour ne pas gêner la réception des signaux.

L'importance du bon fonctionnement du système correcteur dans la pratique du Baudot est considérable. On comprend facilement que si le synchronisme des deux distributeurs est rompu ou incertain, les transmissions sont impossibles.

Effet des parasites.

Les parasites peuvent troubler la correction en supprimant l'élément correcteur de repos. Ils retardent alors les balais en produisant une correction intempestive, d'où il résulte un écart des balais anormal qui désoriente l'ensemble de la réception des signaux. Toute la transmission est bouleversée.

Principe du correcteur de protection.

Pour protéger le synchronisme contre les parasites, on intercale, entre le contact de correction de la 1^{re} couronne et l'électro correcteur,

un dispositif spécial désigné sous le nom de « Protecteur de correction » dont le rôle est le suivant :

Quand un signal de correction se présente sur son contact, il est emmagasiné, mais ne produit pas la correction. Si, au tour suivant, un autre signal se présente et confirme le premier, il est encore emmagasiné sans actionner l'électro-correcteur, mais si la confirmation a lieu par un troisième signal dans le tour suivant, alors la correction agit. En somme, on exige trois signaux correcteurs successifs pour effectuer une fois la correction.

Si le premier signal n'est pas confirmé immédiatement, c'est-à-dire au tour suivant, et cela deux fois de suite, alors, non seulement la correction ne sera pas faite, mais le ou les deux signaux emmagasinés seront effacés.

Il est bien entendu que, pour obtenir un fonctionnement normal de ce dispositif, on devra au préalable régler la vitesse du distributeur corrigé de manière que la correction intervienne normalement une fois sur cinq ou six tours consécutifs, ce qui est facile à obtenir quand les distributeurs sont actionnés par des moteurs phoniques et des diapasons réglables.

La figure 2 représente schématiquement l'effet de la correction, c'est-à-dire l'angle de décalage des balais et les positions successives

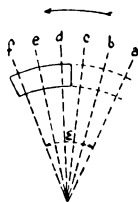


Fig. 2.

que prennent ces balais entre les positions limites.

La figure 3 représente le protecteur de correction et ses connexions.

Sur un même socle sont groupés 3 électros A, B, C, et les organes qu'ils commandent.

On remarque que les électros A et B verrouillent mutuellement leurs armatures, de manière que chacune garde sa position attirée jusqu'à ce que l'autre ait agi à son tour.

Un bâtonnet à crans S poussé à droite par un ressort, peut occuper trois positions dans le sens longitudinal. Un cliquet K, solidaire de l'armature de l'électro A, pousse le bâtonnet et le fait avancer d'un cran de droite à gauche, chaque fois que l'électro A est actionné. L'armature

de l'électro C porte un prolongement qui joue le rôle de cliquet de retenue du bâtonnet. A l'état de repos, elle le maintient en position sur le cran où l'a placé le jeu de l'armature de l'électro A. Quand elle est

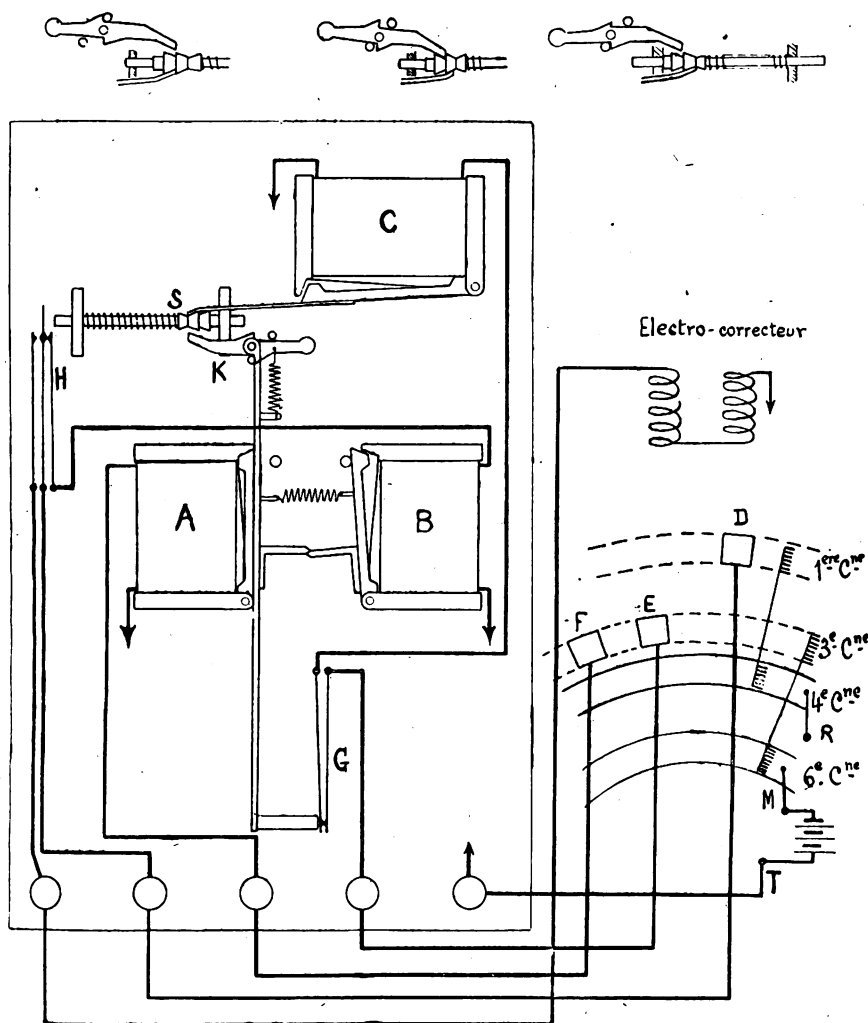


Fig. 3.

mise en jeu par son électro C, elle abandonne le bâtonnet qui revient alors à sa position initiale à droite, poussé par son ressort.

On voit que le cliquet K se déplace entre deux butées qui produisent le dégagement de son bec quand le cliquet atteint les limites de sa course. Ce bec est relevé et engagé quand le cliquet se déplace de droite à gauche.

Les courants de travail correspondant aux éléments reçus par le

poste, arrivent par la borne R, passent par la 4^e couronne du distributeur et sont répartis sur le passage des balais sur les contacts de la 1^{re} couronne parmi lesquels se trouve le contact de correction D.

Les courants locaux arrivent par la borne M, passent par la 6^e couronne du distributeur et sont répartis sur les contacts de la 3^e couronne parmi lesquels se trouvent les contacts E et F.

Le jeu du dispositif se comprend facilement.

Pendant les périodes où le contact de correction n'envoie aucun courant, la correction ne fonctionne pas. L'électro A est actionné à chaque tour par le courant provenant du contact F, mais son armature ayant fonctionné une fois, reste en position attirée, verrouillée par l'armature de l'électro B qui n'est pas excité. L'électro C ayant son circuit fermé en G fonctionne à chaque tour sous l'action du courant provenant du contact E. Son armature mise en jeu périodiquement confirme le dégagement du bâtonnet S.

Si un courant correcteur, normal ou parasite apparaît, il est aiguillé par le commutateur H sur l'électro B. Celui-ci, en manœuvrant son armature, déverrouille l'armature de l'électro A qui coupe le circuit de l'électro C en se libérant.

Mise en mouvement un instant après par le passage du balai sur le contact F, elle fait avancer d'un cran vers la gauche le bâtonnet, puis se laisse verrouiller à nouveau par l'armature de l'électro B.

Au tour suivant, si un courant de correction se présente, il agit comme le précédent. Les mêmes mouvements se reproduisent et le bâtonnet qui est resté retenu par l'armature de l'électro C dont le circuit est coupé est avancé d'un second cran vers la gauche.

A ce moment, la bâtonnet agit sur le commutateur H, il coupe le circuit déverrouilleur de B et ferme le circuit de l'électro correcteur de sorte que, quand le courant de correction se présente pour la 3^e fois, au tour suivant, il actionne l'électro correcteur et la correction est faite.

Le courant local fourni par le contact E qui suit la correction, trouve fermé en G le circuit de l'électro C et excite cet électro qui libère le bâtonnet S. Celui-ci reprend sa position initiale à droite.

D'ailleurs, chaque fois que le courant de correction ne passe pas dans l'électro B, soit parce qu'il n'a pas été lancé par le contact D, soit parce qu'il vient d'agir sur l'électro correcteur, le courant local émanant du contact E qui survient après lui dans le même tour, actionne l'électro décrocheur C et le bâtonnet revient à sa position initiale quelle que soit celle qu'il occupait.

Si des parasites ont pu faire déplacer le bâtonnet d'un ou deux crans, leur action sera détruite au tour suivant, à moins qu'un nouveau parasite ou un courant régulier ne se présente au même instant relatif ainsi qu'il a été décrit précédemment.

Efficacité de son fonctionnement.

On peut se rendre compte de l'efficacité du système en le soumettant au calcul des probabilités.

En admettant, par exemple, un état hypothétique de l'atmosphère dans lequel les parasites ont une fréquence moyenne égale à 40 pour cent de celle des courants de travail ou, ce qui revient au même, à 20 pour cent du nombre des plots du distributeur.

Sans protecteur la correction, étant vulnérable par un contact, serait atteinte une fois tous les cinq tours par un courant parasite. Celui-ci se substituerait au courant normal de correction qui a la même fréquence moyenne et le synchronisme serait vite perdu. Il ne pourrait plus être rétabli automatiquement.

Si le protecteur entre en action, les parasites qui se présentent sur le plot de correction n'affectent plus l'électro-correcteur que dans le cas où ils apparaissent à trois passages successifs des balais, cas qui ne se présente que tous les 5 tours et qui, à cause de sa rareté, ne s'opposerait pas à l'établissement automatique du synchronisme. En outre on voit, sur la figure 2, que le courant normal de correction occupe 3 fois sur 5 le contact de correction quand le synchronisme est établi. Il n'est donc exposé que 2 fois sur 5 aux parasites et encore si le parasite se présente quand le courant normal se termine à la position B en avant du contact de correction, son effet perturbateur sera détruit au tour suivant. En somme, le contact de correction n'est exposé qu'une fois sur 5 tours et l'effet d'une perturbation sera d'avancer d'un tour le fonctionnement de la correction, ce qui correspondrait à une augmentation de l'angle ε de $1/5$ de sa valeur. Cette perturbation aurait lieu tous les $(5)^2$ tours. Le résultat serait insignifiant.

Pour obtenir une perturbation double, c'est-à-dire égale à $2/5 \varepsilon$ il faudrait une moyenne de $(5)^4$ tours. Mais, pour troubler vraiment le synchronisme, il faudrait que la perturbation atteigne au moins la valeur de ε , ce qui n'arrivera en moyenne que tous les $(5)^{10}$ tours.

Or $(5)^{10} = 9\ 765\ 625$.

En faisant une large part à ce qu'il peut y avoir d'arbitraire ou d'incorrect dans un tel calcul, on peut cependant retenir que la correction est efficacement protégée.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU FILTRAGE DES COURANTS REDRESSÉS ⁽¹⁾

par M. M. DEMONTVIGNIER

Chef du Service technique de la Société anonyme Hewittie.

Le développement considérable pris par les redresseurs de courant de divers types au cours de ces dernières années, et leur utilisation dans diverses applications exigeant du courant mieux redressé que celui qu'ils peuvent fournir directement, ont mis à l'ordre du jour la question du filtrage des courants ondulés. Nous nous proposons, dans la présente étude, de réunir quelques données théoriques et expérimentales relatives à cette question.

Nous examinerons d'abord les courbes de tension redressée brute, données par les redresseurs des types les plus utilisés, et les valeurs admissibles pour les ondulations après filtrage dans les diverses applications.

Nous étudierons ensuite les éléments entrant dans la construction des filtres, en insistant particulièrement sur les bobines d'inductance à noyau de fer placées dans les circuits parcourus par des courants redressés, nous donnerons à ce propos les résultats de recherches expérimentales effectuées sur les propriétés magnétiques du fer travaillant dans ces conditions.

Nous terminerons par un examen rapide des divers procédés de filtrage utilisés.

FORMES DES TENSIONS REDRESSÉES NON FILTRÉES.

Les tensions redressées données par la plupart des redresseurs ont des courbes représentatives se rapprochant beaucoup d'une succession

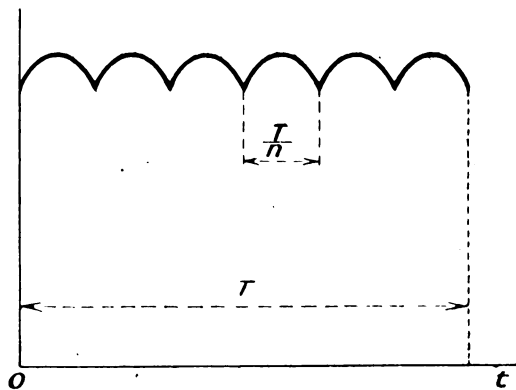


Fig. 1. — Courbe type d'une tension redressée à n phases.

de n crêtes de sinusoïdes, déphasées l'une par rapport à l'autre de l'intervalle $\frac{2\pi}{n}$. Telles sont, en particulier, les courbes données par

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre le Vendredi 25 octobre 1939.

les redresseurs à-vapeur de mercure, les redresseurs à cathode incandescente et atmosphère gazeuse, et, toutefois d'une manière moins rigoureuse, celles des kénotrons et des redresseurs à oxyde de cuivre.

La courbe type de tension redressée est représentée, pour un redresseur à n phases, par la figure 1. Elle est périodique, de fréquence égale à n fois la fréquence d'alimentation: elle se décompose en un terme continu et une succession d'harmoniques. L'harmonique de rang p dont la fréquence est égale à pn fois la fréquence d'alimentation du redresseur, a une valeur maximum, dont le rapport

à la valeur du terme continu a pour expression : $\frac{2}{p^2n^2 - 1}$.

Le tableau suivant donne les valeurs de ce rapport pour les nombres de phases usuels :

p	$n = 2$	$n = 3$	$n = 6$	$n = 12$
1	0,66	0,25	0,037	0,014
2	0,133	0,037	0,014	0,003
3	0,037	0,025	0,006	0,001

Diverses influences provoquent en outre l'apparition, dans la tension redressée, d'harmoniques de fréquence inférieure à n fois la fréquence d'alimentation :

1° Une dissymétrie dans le redresseur se traduit par l'apparition de la fréquence fondamentale et de tous ses multiples; cet inconvénient se produit, en particulier, dans les redresseurs à plusieurs cathodes chaudes; il est facile à éviter dans les redresseurs à vapeur de mercure, qu'on peut rendre symétriques sans difficulté.

2° Un déséquilibre des tensions d'alimentation : il se traduit dans les redresseurs à nombre impair de phases, par l'apparition de la fréquence fondamentale et de ses harmoniques; au contraire, pour les redresseurs à nombre pair de phases, apparaissent seulement les multiples pairs de la fréquence.

Il importe de tenir compte de ces fréquences parasites dans les problèmes de filtrage.

Les formes des tensions redressées dépendent, en outre, d'une part, de la forme de la tension d'alimentation et, d'autre part, du courant débité par le redresseur. L'expérience montre, toutefois, qu'en général on peut négliger ces influences et adopter les valeurs données plus haut pour les divers harmoniques.

Un redresseur se comporte alors, en première approximation, comme une source de tensions alternatives d'amplitudes constantes,

superposées à une tension continue, le courant total débité étant assujéti à rester toujours positif.

VALEUR DES ONDULATIONS ADMISES.

L'ondulation maximum admise pour un courant redressé varie avec l'usage qu'on veut en faire; nous sommes donc amenés à examiner les diverses applications du filtrage des courants redressés.

1° Alimentation des postes de T.S.F.

a) *Postes émetteurs.* — Les tensions anodiques élevées, utilisées actuellement sur les oscillateurs à triodes, sont plus faciles à obtenir avec des redresseurs qu'avec des génératrices. La tension redressée brute est généralement trop ondulée et doit être filtrée.

Lorsqu'il s'agit de l'alimentation d'un poste émetteur de télégraphie, on peut se contenter d'un filtrage assez sommaire, ramenant l'ondulation de la tension redressée à ± 1 pour cent environ de la valeur moyenne.

Au contraire, l'alimentation d'un poste émetteur de téléphonie, nécessite un filtrage beaucoup plus complet. L'utilisation, pour la réception, d'appareils de plus en plus sensibles aux basses fréquences, a conduit à réduire considérablement les ondulations admises, jusqu'à des valeurs de $\pm 0,05$ pour cent par exemple pour la fréquence de 50 p : s et des valeurs bien plus faibles pour les fréquences élevées. Un filtrage aussi parfait est d'ailleurs très coûteux et on se contente souvent de valeurs plus élevées pour l'ondulation.

b) *Postes récepteurs.* — Le nombre d'appareils récepteurs utilisant des redresseurs pour l'alimentation en tension anodique est actuellement très élevé. Là encore, il est nécessaire de se montrer très exigeant sur la qualité du filtrage et de n'admettre, pour des récepteurs sensibles, que des ondulations sur la tension anodique, inférieures à 0,05 pour cent pour la fréquence de 50 p : s.

On a construit également, depuis peu, des redresseurs fournissant directement la tension de chauffage des triodes et des filtres permettant leur utilisation dans les postes récepteurs. Là encore, les ondulations admises doivent être très faibles, par exemple de l'ordre de $\pm 0,1$ pour cent pour la fréquence de 50 p : s sur un récepteur sensible.

2° Réduction des perturbations apportées aux lignes téléphoniques.

Ce problème s'est posé, très rarement d'ailleurs, dans l'exploitation de certaines lignes de distribution d'énergie alimentées par des redresseurs à vapeur de mercure. On a pu, dans tous les cas, éliminer les perturbations par l'emploi de filtres à résonance, en ramenant l'ondulation de la tension redressée à $\pm 0,5$ pour 100 de la valeur moyenne, pour des fréquences de 150 à 600 p : s.

ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION DES FILTRES.

Les organes essentiels entrant dans la construction des filtres à courants redressés sont les condensateurs et les bobines d'inductance avec ou sans fer.

Condensateurs.

On dispose aujourd'hui, grâce aux efforts de divers constructeurs, de nombreux types de condensateurs permettant de résoudre les problèmes posés par le filtrage des courants redressés. Ces condensateurs sont de divers types :

1° Les condensateurs électrolytiques à liquide immobilisé, permettant de réaliser, sous un volume réduit, des capacités considérables de quelques milliers de microfarads, peuvent être employés pour des tensions redressées atteignant une dizaine de volts.

2° Les condensateurs isolés au papier immergé dans l'huile, peuvent être employés pour la réalisation de filtres à résonance sur les distributions d'énergie par redresseurs. Ils conviennent pour des tensions atteignant 600 volts.

3° Les condensateurs isolés au papier paraffiné ou bakelisé peuvent être utilisés pour des tensions beaucoup plus élevées. On construit couramment des modèles supportant des tensions de service de 10 000 à 12 000 volts.

Les pertes diélectriques dans les condensateurs prennent parfois une grande importance, par exemple dans les filtres à résonance, où leur connaissance est, comme nous le verrons, un élément très important du calcul.

Bobines d'inductance sans fer.

Les bobines d'inductance sans fer trouvent parfois leur utilisation dans la construction des filtres, en particulier dans des circuits résonants qu'on doit accorder sur une fréquence déterminée.

On adopte alors généralement, pour le bobinage, la forme du tore à section carrée donnant l'inductance maximum (fig. 2), c'est-à-dire pour lequel :

$$r = 1,85a.$$

On sait que, dans ce cas, l'inductance de la bobine est donnée par la formule :

$$L = 35,3N^2a \times 10^{-9} \text{ henry,}$$

N désignant le nombre de spires, a étant le côté du carré formant la section.

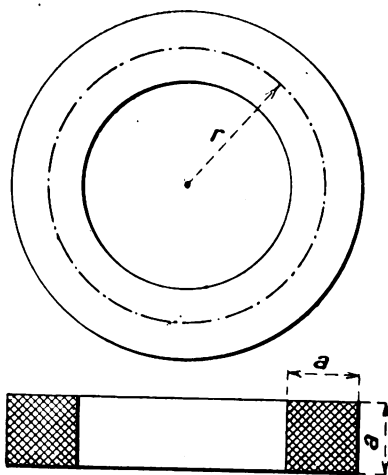


Fig. 2. — Bobine d'inductance sans fer.

On a, le plus souvent, avantage à constituer la bobine par deux ou plusieurs galettes superposées, séparées par des canaux de ventilation. On peut ainsi régler exactement la valeur de l'inductance, ce qu'on peut avoir à effectuer, par exemple pour ajuster une résonance.

Bobines d'inductance avec fer.

Généralités. — Les bobines d'inductance à noyau de fer constituent l'un des principaux organes des filtres électriques ; elles sont alors employées dans des circuits parcourus par les courants redressés, où se superposent une composante continue et des composantes alternatives.

Leur circuit magnétique est donc le siège d'un flux continu auquel vient se superposer un flux alternatif d'amplitude généralement faible par rapport à celle du premier.

Ces conditions d'emploi sont très différentes des conditions normales d'utilisation des matériaux magnétiques; en effet, alors qu'on soumet d'ordinaire ceux-ci à des flux alternatifs oscillant avec une grande amplitude autour d'une valeur moyenne nulle, il s'agit ici d'oscillations de flux de faible amplitude autour d'une valeur moyenne élevée.

Pour éclairer ce qui va suivre, il n'est pas inutile de revenir rapidement sur la notion de perméabilité magnétique au flux alternatif.

Considérons un circuit magnétique sur lequel se trouve bobiné un enroulement de n spires et de résistance R , parcouru par un courant instantané i . Ce circuit possède, par hypothèse, une section constante S , et il est constitué par un milieu ferromagnétique, interrompu en un point par un entrefer e .

Soit l la longueur de la ligne de force moyenne dans le fer. Il la valeur du champ dans celui-ci. On a, d'après le théorème d'Ampère, en remarquant que le champ dans l'entrefer a pour valeur l'induction B :

$$lH + eB = 4\pi ni.$$

D'autre part, la tension aux bornes de l'enroulement a pour expression :

$$u = Ri + nS \frac{dB}{dt}.$$

On déduit facilement de ces deux équations la suivante :

$$u = Ri + \frac{4\pi n^2 S}{e + \frac{l}{\frac{dB}{dH}}} \frac{di}{dt}.$$

Le coefficient de $\frac{di}{dt}$ mesure l'inductance instantanée de l'enroulement, qu'on peut donc calculer par les formules ordinaires, en attribuant au milieu ferromagnétique une perméabilité magnétique instantanée ayant pour valeur :

$$\mu = \frac{dB}{dH}.$$

Considérons maintenant un circuit magnétique travaillant dans les conditions ordinaires, c'est-à-dire étant le siège d'un flux alternatif d'amplitude notable. Le fer de ce circuit magnétique décrira un cycle d'hystérésis représenté en pointillé sur la figure 3; on devra lui attribuer en chaque point du cycle une perméabilité $\mu = \frac{dB}{dH}$. Or, la seule inspection des courbes d'hystérésis décrites dans ces conditions, montre que la perméabilité instantanée ne s'écarte pas beaucoup de la

pente de la droite joignant l'origine au sommet du cycle (sommet situé d'ailleurs sur la courbe de première aimantation). On peut donc adopter cette pente comme perméabilité moyenne et la supposer constante dans les calculs. L'expérience montre que cette approximation est pra-

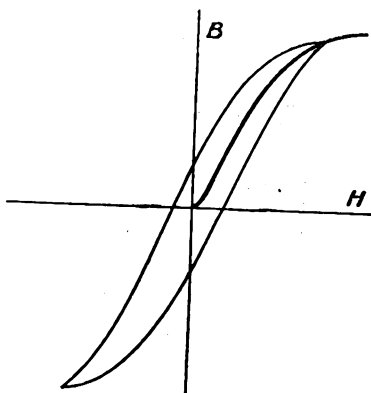


Fig. 3. — Cycle d'hystérésis ; courant alternatif seul.

tiquement suffisante, on est ainsi conduit à attribuer à la tôle au silicium extra-supérieure des perméabilités moyennes très élevées, de 3000 à 5000 par exemple pour des inductions comprises entre 4000 et 10000. Dans ces conditions, on a presque toujours le droit de négliger la réluctance du fer devant celle d'un entrefer de quelques millimètres par exemple.

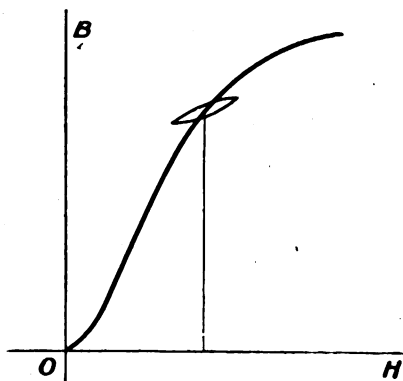


Fig. 4. — Cycle d'hystérésis obtenu par courant alternatif superposé à un courant continu.

En est-il encore de même dans le cas où un flux alternatif de faible amplitude se superpose à un flux continu important? L'expérience

montre qu'il n'en est rien et *qu'on doit attribuer à la perméabilité moyenne du fer des valeurs bien inférieures aux précédentes.*

L'explication de cette différence doit être cherchée dans le fait que le fer décrit alors un cycle d'hystérésis très incliné sur la courbe de première aimantation, comme le montre la figure 4.

On pourrait, pour obtenir les valeurs des perméabilités moyennes correspondantes, les déduire du tracé de ces cycles d'hystérésis. Nous avons préféré les déduire de mesures d'inductance effectuées en courant alternatif. On trouvera ci-dessous l'exposé de la méthode de mesure employée et des résultats numériques obtenus.

Mesure des perméabilités moyennes. — Les mesures ont porté sur des échantillons de tôles au silicium extra-supérieures, donnant à la fréquence 50 p : s, pour une induction maximum de 10 000, des pertes totales de 1,56 W par kilogramme.

Il a été constitué, avec ces tôles, deux tores de dimensions égales pesant chacun 6,420 kg et présentant chacun une longueur de ligne de force moyenne de 87 cm, pour une section nette de 9,85 cm². Sur chacun de ces tores ont été disposés, aussi régulièrement que possible, trois enroulements.

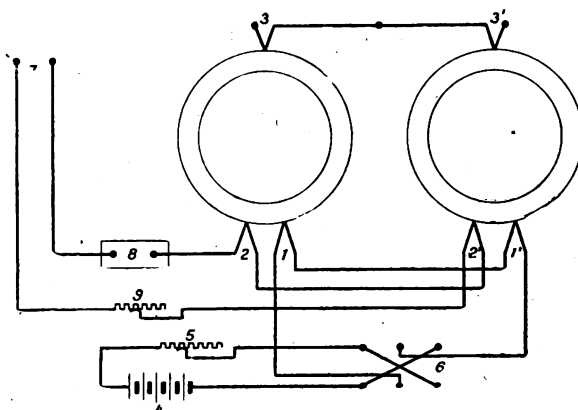
- 1° Un enroulement magnétisant à courant continu de 136 spires ;
- 2° Un enroulement magnétisant à courant alternatif de 136 spires également ;
- 3° Un enroulement de mesure des flux alternatifs comprenant 750 spires.

L'enroulement magnétisant à courant continu d'un des tores était connecté en série avec celui de l'autre tore ; il en était de même des deux enroulements magnétisants à courant alternatif, les sens de couplage magnétique entre les enroulements à courant continu et alternatif étaient inversés sur les deux tores, de sorte qu'il ne pouvait y avoir induction de courants alternatifs dans le circuit à courant continu.

Le schéma de principe du montage utilisé est représenté par la figure 5. Le courant continu est fourni par la batterie 4, et réglable au moyen du rhéostat 5. L'inverseur 6 permet de définir l'aimantation continue des circuits magnétiques ou de les désaimanter complètement selon la méthode bien connue utilisée dans les mesures magnétiques. Cette définition exacte de l'aimantation est absolument nécessaire à des mesures correctes, car on observe, par exemple, que l'aimantation rémanente suffit pour diminuer notablement la perméabilité des tôles à un flux alternatif de faible amplitude.

Le circuit à courant alternatif comprend également un rhéostat de réglage 9 et une boîte de résistances étalonnées 8.

Au cours d'essais préliminaires, on a soumis d'abord les deux tores,



- 1, 1' : Sorties des enroulements magnétants à courant continu.
 2, 2' : — — — — — alternatif.
 3, 3' : — — — — — de mesure des flux.
 4 : Batterie d'accumulateurs.
 5 : Rhéostat de réglage du courant continu.
 6 : Inverseur.
 7 : Bornes d'alimentation en courant alternatif.
 8 : Boîte de résistances.
 9 : Rhéostat de réglage du courant alternatif.

Fig. 5. — Schéma pour la mesure de la perméabilité moyenne des tôles.

préalablement désaimantés, à un essai dans les conditions normales d'utilisation en alimentant seulement les enroulements magnétants à courant alternatif. On mesurait la tension aux bornes des enroulements, le courant et la puissance dépensée ; on en a déduit, après calculs et corrections, le tableau I fournissant en fonction de l'induction maximum les pertes totales en watts par kilogramme et les ampères-tours magnétisants maxima par centimètre, pour l'échantillon utilisé.

TABLEAU I. — Tôles au silicium extra-supérieures de 0,4 mm. Essai en courant alternatif sinusoïdal. Fréquence 50 p : s.

Induction maximum	3960	5000	6000	7000	8000	9010	10000
Ampères tours max/cm	0,567	0,740	0,889	1,12	1,315	1,73	2,17
Watts/kg	0,316	0,462	0,615	0,799	1,01	1,25	1,535
Induction maximum	10980	12000	13000	13500	14000	14500	
Ampères tours max/cm	2,72	3,80	5,5	6,6	8,48	10,4	
Watts/kg	1,835	2,26	2,57	2,81	3,18	3,56	

On a procédé ensuite aux essais des tôles en alimentant simultanément les enroulements à courant continu et à courant alternatif, le mode opératoire étant le suivant : on commence par définir l'aimantation des circuits magnétiques, en faisant croître progressivement le

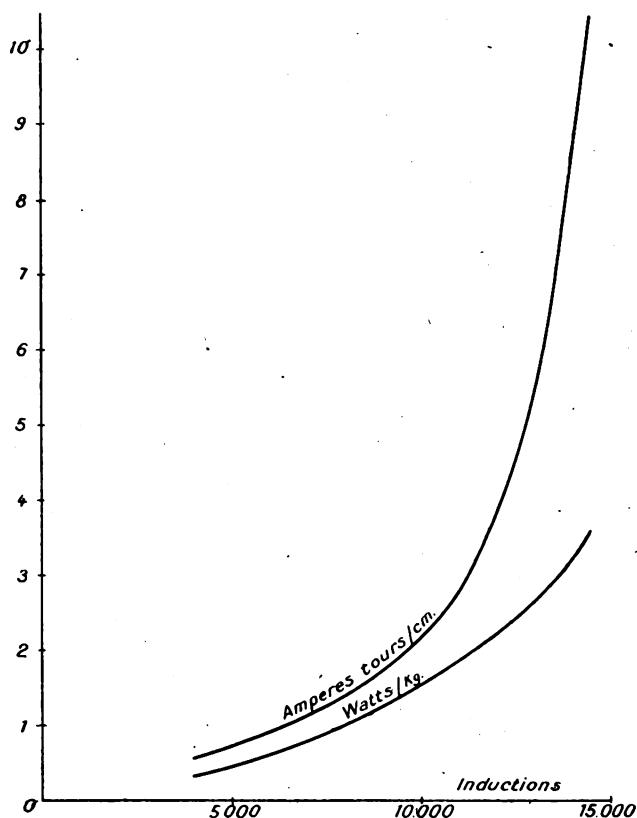


Fig. 6. — Traduction graphique du tableau I, ampères-tours magnétisants et pertes totales en fonction de l'induction maximum.

courant continu jusqu'à une valeur déterminée, tout en manœuvrant l'inverseur 6 ; les tôles ont été préalablement désaimantées. On lance alors le courant alternatif, auquel on donne diverses valeurs ; on mesure pour chacune d'elles la tension aux bornes d'un ou des deux circuits de mesure 3 et 3' (selon la sensibilité requise), et aux bornes de la résistance étalonnée 8 d'où l'on déduit le courant. Pour ces mesures, l'instrument qui s'est montré le plus convenable, vu la faible valeur des tensions utilisées (quelques volts efficaces) et la nécessité de n'utiliser pour les mesures qu'un débit négligeable, a été un électromètre à quadrants à montage idiostatique. Un commutateur permettait

d'effectuer rapidement les mesures de courant et de tension. La tension aux bornes des enroulements de mesure permettait le calcul facile des flux alternatifs; le courant alternatif dans l'enroulement magnétisant donnait le champ. On en déduit facilement la perméabilité moyenne, dont la mesure ne dépend finalement que de l'étalonnage de la boîte de résistance 8.

Il a été effectué des mesures pour les fréquences 50 et 150 p : s les résultats obtenus pour les deux fréquences coïncident aux erreurs d'expérience près.

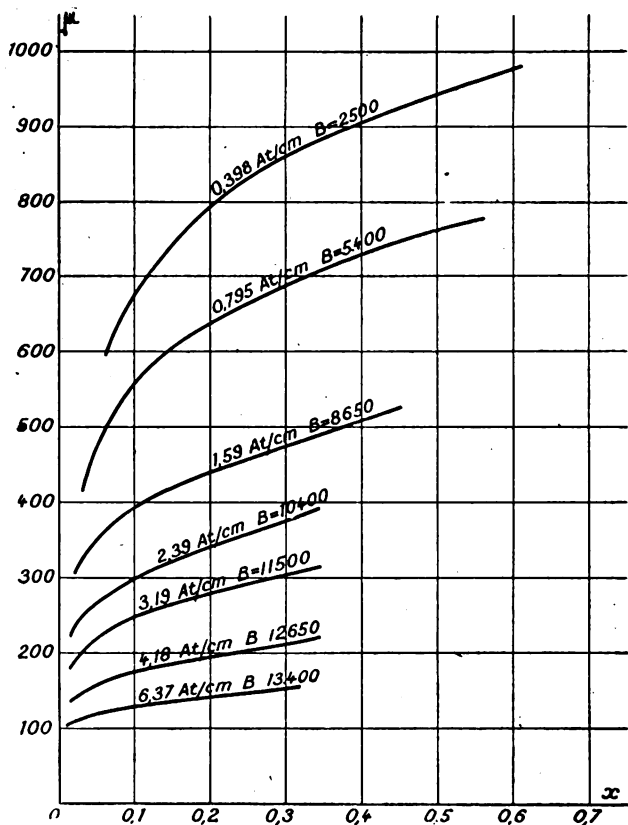
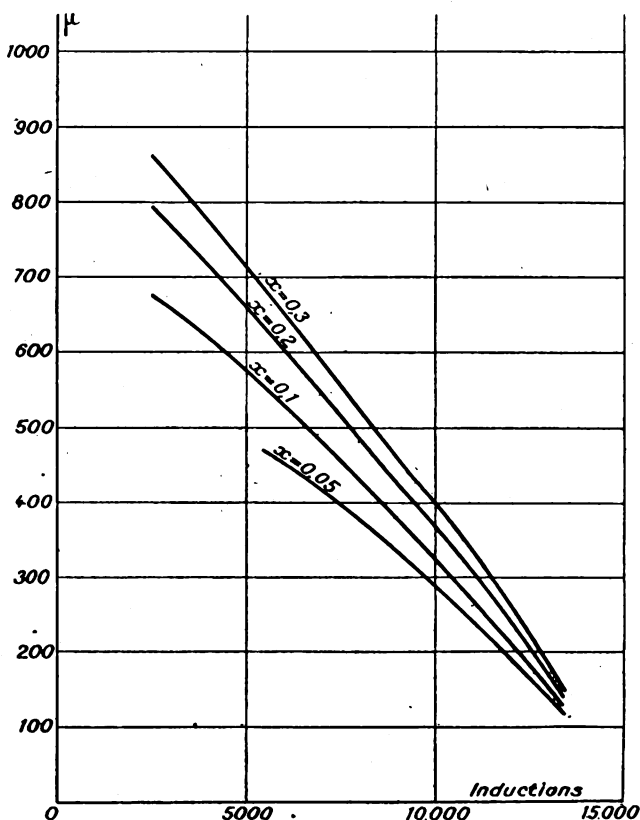


Fig. 7. — Traduction graphique des tableaux II et III. — Perméabilités.

L'expérience montre en outre que, le champ continu étant maintenu à une valeur fixe, la perméabilité s'accroît notablement lorsqu'on augmente l'amplitude du champ alternatif superposé. De plus, les perméabilités observées sont d'autant plus faibles que le champ continu prend une valeur plus élevée.

Les résultats numériques obtenus figurent dans les tableaux II et III.

Dans chacun de ces tableaux, on trouvera, pour chaque valeur des ampères-tours continus par centimètre, correspondant à une induction continue déterminée, les valeurs des perméabilités μ , exprimées en fonction du rapport du champ alternatif maximum au champ continu. Comme on l'a indiqué plus haut, on voit que les perméabilités moyennes qu'on doit attribuer au fer sont incomparablement plus faibles que celles qu'on observe dans les conditions normales.



F. 8. — Perméabilité en fonction de l'induction continue.

L'ensemble des résultats numériques a été reporté sur les courbes de la figure 7. De ces courbes, on a déduit celles de la figure 8, donnant, en fonction de l'induction continue, la perméabilité qu'on doit adopter pour des valeurs déterminées du rapport :

$$x = \frac{\text{champ alternatif}}{\text{champ continu}}$$

Les mesures précédentes sont des mesures industrielles, qui ne prétendent pas à une grande précision. Elles donnent toutefois un ordre de

grandeur suffisant pour des calculs pratiques relatifs à l'une des qualités de tôles les plus employées.

La méthode de mesure décrite plus haut a l'inconvénient de demander la confection de tôres avec le métal étudié. Il serait possible d'éviter cette difficulté en utilisant des barreaux droits magnétisés par des solénoïdes de grande dimension, comme dans le perméamètre Carpentier. On disposerait ainsi d'une méthode pratique d'essai des matériaux magnétiques dans les conditions qui nous occupent.

Il est possible qu'en modifiant convenablement la composition des alliages, on obtienne des matériaux magnétiques beaucoup plus perméables que ceux dont on dispose actuellement aux flux alternatifs superposés à un flux continu. L'intérêt de cette recherche n'est d'ailleurs pas limité aux bobines d'inductance de filtres, il s'étend aussi à la construction des transformateurs d'amplificateurs basse fréquence de T.S.F., dont le circuit magnétique travaille précisément dans les mêmes conditions.

Il semble que des résultats encourageants dans ce sens aient été obtenus en Amérique; citons, en particulier, le « métal A », obtenu par l'Ajax Electrothermic Corporation, alliage de fer, nickel et cuivre, exempt de carbone, qui présente des perméabilités notablement supérieures à celles de la tôle au silicium. Voici, à titre de comparaison avec les mesures précédentes, quelques chiffres relatifs au « métal A », accompagnés des chiffres correspondants relatifs à la tôle au Silicium :

Induction continue.		5500	8400	10300	11600
Ampères tours continus par cm. . .	Métal A.	0,41	0,82	1,62	3,03
	Tôle au silicium.	0,52	1,5	2,3	3,3
Perméabilités aux flux alternatifs ($\omega = 0,05$)	Métal A.	1060	790	525	347
	Tôle au silicium.	467	360	275	210

Les chiffres relatifs au « métal A » ont été déduits de mesures américaines effectuées sur ce métal, et qui m'ont été obligeamment communiqués par M. CHAUCHAT. On voit que ce métal présente, pour le flux continu, une perméabilité notablement supérieure à celle de la tôle au silicium; quant à la perméabilité au flux alternatif, elle est sensiblement doublée par rapport à celle-ci, à induction continue égale.

Nous allons maintenant utiliser les résultats numériques précédents au calcul des bobines d'inductance à courant redressé. Nous nous bornerons au cas des bobines à entrefer. Proposons-nous d'abord de

rechercher l'induction à laquelle il y a intérêt à faire travailler un circuit magnétique à entrefer pour en tirer le meilleur parti possible.

Détermination de l'induction optimum pour un circuit magnétique à entrefer. — Soit un circuit magnétique formé de tôles de section brute constante S , la longueur de la ligne de force moyenne dans le fer étant l ; soit e l'entrefer.

L'inductance obtenue en bobinant n spires sur ce circuit magnétique a pour expression, en désignant par $\mathcal{R}$ la réluctance de celui-ci.

$$L = \frac{4\pi n^2}{\mathcal{R}} \times 10^{-9} \text{ henrys}$$

La plus grande inductance possible correspond donc au minimum de $\mathcal{R}$.

Soit nI le nombre d'ampères-tours moyens sur le circuit magnétique; ces ampères-tours donnent une induction moyenne B . Soit A le nombre d'ampères-tours absorbés par 1 cm de fer. En admettant pour le coefficient d'utilisation des tôles la valeur 0,9, l'induction moyenne dans l'entrefer est 0,9 B et celui-ci absorbe par centimètre $0,8 \times 0,9B = 0,72B$. On a donc l'équation des ampères-tours :

$$nI = 0,72Be + Al.$$

Soit μ la perméabilité du fer au flux alternatif dans les conditions étudiées; on a, pour la réluctance, la valeur :

$$\mathcal{R} = \frac{1}{S} \left(\frac{l}{0,9\mu} + e \right) = \frac{1}{S} \left(\frac{l}{0,9\mu} + \frac{nI - Al}{0,72B} \right)$$

ou

$$\mathcal{R} = \frac{1}{S} \left(\frac{1}{0,9\mu} + \frac{\frac{nI}{l} - A}{0,72B} \right).$$

L'induction donnant la réluctance minimum au flux alternatif, sera celle qui rendra minimum l'expression :

$$y = \frac{1}{0,9\mu} + \frac{\frac{nI}{l} - A}{0,72B} = \frac{1}{0,9} \left[\frac{1}{0,8B} \frac{nI}{l} - \left(\frac{A}{0,8B} - \frac{1}{\mu} \right) \right].$$

On peut supposer, avec une approximation suffisante pour la pratique que la perméabilité μ ne dépend que de l'induction B . Dans ces conditions, on voit que l'induction optimum qu'on doit adopter ne dépend que du rapport $\frac{nI}{l}$; considérons maintenant l'expression :

$$z = - \left(\frac{A}{0,8B} - \frac{1}{\mu} \right).$$

Cette expression est positive. Traçons sa courbe de variation en fonction de $\frac{1}{B}$. On voit facilement que le point de cette courbe correspondant au minimum de y est le point où sa tangente a pour pente :

$$-\frac{1}{0,8} \frac{nI}{l} = -1,25 \frac{nI}{l}.$$

Pour connaître la valeur de $\frac{nI}{l}$ pour laquelle une valeur déterminée de l'induction est la valeur optimum, il suffit donc de tracer au point correspondant de la courbe de z en fonction de $\frac{1}{B}$ la tangente et de diviser par 1,25 la pente de celle-ci.

En appliquant cette méthode aux valeurs de μ relatives à la tôle extra-supérieure au silicium et correspondant à $x = 0,1$, on obtient le tableau IV donnant la variation de l'induction optimum en fonction de $\frac{nI}{l}$.

TABLEAU IV. — *Circuits magnétiques formés de tôles au silicium extra-supérieures. — Variation de l'induction optimum en fonction du rapport $\frac{nI}{l}$.*

Induction optimum . . .	8000	9000	10000	11000	12000	13000	6190	4000
$\frac{nI}{l}$	11,2	19,4	41	69	121	364	5	0,8

Ces valeurs numériques ont été reportées sur la courbe (fig. 9).

Dans les circuits magnétiques usuels, les valeurs de $\frac{nI}{l}$ admissibles conduisent à adopter des inductions continues variant entre 10 000 et 12 000 dans les tôles.

Méthode de calcul applicable à une série de bobines à inductance à entrefer. — Considérons d'abord un circuit magnétique quelconque, sur lequel nous placerons un bobinage de n spires, parcouru par un courant efficace I . Soit P le poids du cuivre de cet enroulement, d la densité du cuivre; le volume net de celui-ci est $\frac{P}{d}$. Soit λ la longueur de la spire moyenne. Calculons les pertes par effet Joule : le

volume d'une spire est $\frac{P}{dn}$, sa section $\frac{P}{dn\lambda}$. La résistance de l'enroulement est donc : $\rho \frac{dn^2\lambda^2}{P}$.

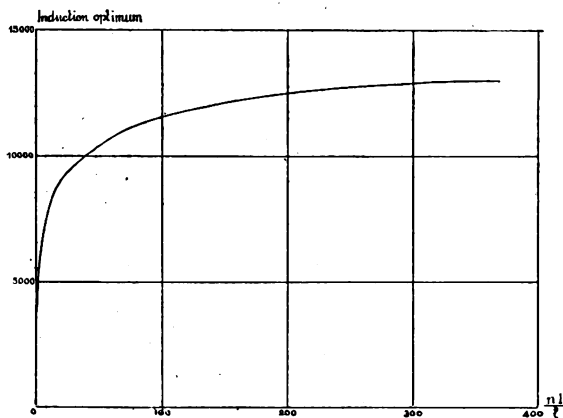


Fig. 9. — Traduction graphique du tableau IV.

La surface d'évacuation du bobinage est, en négligeant les tranches des extrémités, $2\lambda h$, h étant la hauteur. D'où, en admettant une surface de dissipation de c cm² par watt, l'équation suivante :

$$\frac{2\lambda h}{c} = \rho \frac{d\lambda^2}{l^2} n^2 l^2$$

ou :

$$n^2 l^2 = \frac{2Ph}{\rho d\lambda c}.$$

Cette formule permet de calculer les ampères-tours qu'on peut loger sur un circuit magnétique, sous forme d'un poids P de cuivre, dans des conditions d'échauffement et avec une spire moyenne déterminées.

Considérons maintenant une bobine d'inductance à courant redressé, son inductance a pour valeur :

$$L = \frac{4\pi n^2}{\mathcal{R}} \times 10^{-9} \text{ henrys.}$$

On verra plus loin que le prix de revient d'une bobine d'inductance peut se caractériser par la quantité ωLI^2 , ω étant la pulsation corres-

pendant à une fréquence déterminée de 50 p : s par exemple. On a ainsi :

$$\omega LI^2 = \frac{4\pi\omega}{cR} \times 10^{-9} n^2 I^2 \text{ voltampères.} \quad (1)$$

Nous désignerons cette quantité sous le nom de « *puissance* » de la bobine.

Supposons maintenant qu'on dispose d'une série de circuits magnétiques et qu'on se propose de calculer entre quelles limites de ωLI^2 chacun d'eux doit être adopté. Pour chaque circuit magnétique, on considère diverses valeurs de l'épaisseur du bobinage ε ; on calcule ensuite, pour chacune d'elles, la spire moyenne λ ; on en déduit le poids de cuivre correspondant, par la formule :

$$P = \lambda \varepsilon h \alpha d, \quad (2)$$

α étant le coefficient d'utilisation du cuivre (rapport de la section utile à la section moyenne) auquel on donne une valeur moyenne.

Calculons maintenant les ampères-tours correspondants : on a :

$$nI = \sqrt{\frac{2\lambda \varepsilon h^2 \alpha d}{\rho d \lambda c}} = h \sqrt{\frac{2\alpha}{\rho c}} \sqrt{\varepsilon}. \quad (3)$$

On en déduit la valeur correspondante du rapport $\frac{nI}{l}$, l étant la ligne de force moyenne dans le fer; à cette valeur correspond une valeur optimum de l'induction continue B dans le fer.

On calcule ensuite la valeur de la « *puissance* » ωLI^2 , pour $\omega = 314$.

On a :

$$\omega LI^2 = \frac{314 \times 4\pi}{y} \times 10^{-9} \frac{S}{l} n^2 I^2 \text{ voltampères,}$$

y , désignant comme on l'a vu plus haut, la fonction :

$$y = \frac{1}{0,9\mu} + \frac{\frac{nI}{l} - A}{0,72B}.$$

Pour simplifier la formule donnant ωLI^2 , on peut tracer à l'avance la courbe de l'expression :

$$\beta = \frac{314 \times 4\pi \times 10^{-9}}{y}$$

en fonction de $\frac{nI}{l}$; on obtient ainsi la formule définitive :

$$\omega LI^2 = \beta \frac{S}{l} n^2 I^2 \text{ voltampères.} \quad (4)$$

La densité de courant est donnée par la formule :

$$\delta = \frac{nI}{\alpha sh} \quad (5)$$

Enfin, l'entrefer correspondant est donné par l'équation :

$$e = l \frac{\frac{nI}{l} - A}{0,72B}$$

En traçant à l'avance la courbe de l'expression :

$$\gamma = \frac{\frac{nI}{l} - A}{0,72B}$$

en fonction de $\frac{nI}{l}$, on a la formule simplifiée :

$$\epsilon = \gamma l \quad (6)$$

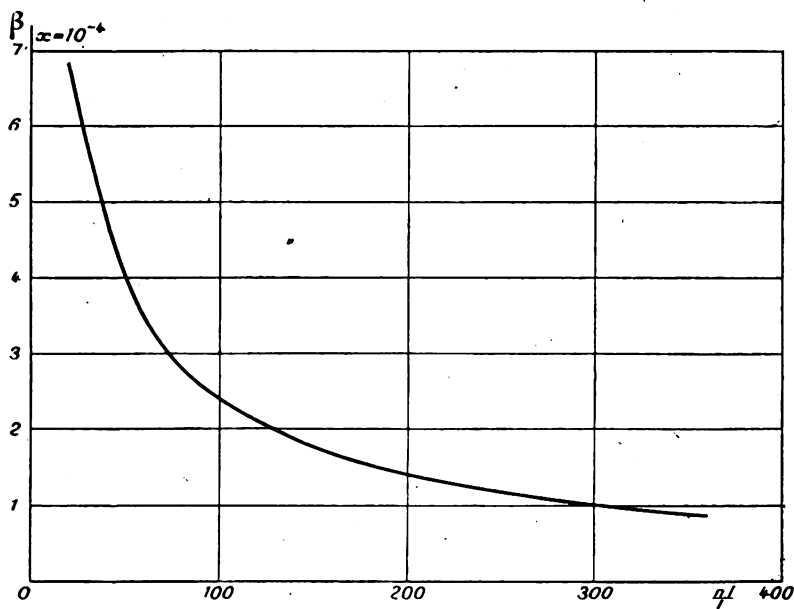


Fig. 10. — Graphique des valeurs de β en fonction de $\frac{nI}{l}$.

On trouvera sur les figures 10 et 11 les courbes de variation de β et γ en fonction de $\frac{nI}{l}$ pour des circuits magnétiques formés de tôles au silicium, les valeurs de μ étant rapportées à $x = 0,1$.

Dans les formules précédentes intervient le coefficient α d'utilisation du cuivre, qui reste indéterminé *a priori*; les calculs pratiques montrent, toutefois, que les courbes donnant le prix de revient des

bobines d'inductance en fonction de ωLI^2 en dépendent fort peu. On est donc fondé, en première approximation, à considérer le prix de revient d'une bobine d'inductance à entrefer comme fonction de sa seule puissance ωLI^2 .

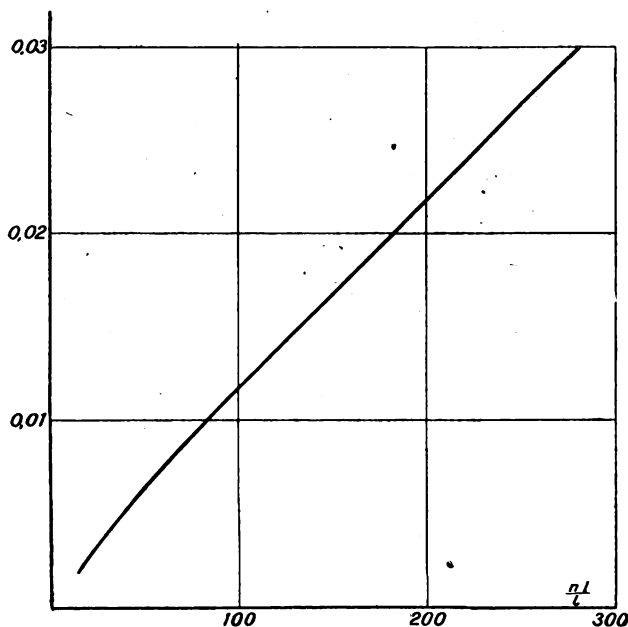


Fig. 11. — Graphique des valeurs de γ en fonction de $\frac{nI}{l}$.

On peut alors tracer, en fonction de ωLI^2 , les courbes donnant les poids de cuivre P , les ampères-tours nI , les entrefers e , les densités courant δ et les prix de revient. Un circuit magnétique d'une série, convient dans l'intervalle de puissance où son prix de revient est le plus faible possible. Une telle série de courbes, établie pour une valeur moyenne du coefficient d'utilisation α , suffit parfaitement à l'établissement d'un avant-projet.

Les prix de revient des bobines d'inductance à entrefer sont beaucoup moins élevés, à puissance égale, que ceux des bobines sans fer (le rapport est environ de moitié pour des puissances ωLI^2 de l'ordre de 10 kVA). De plus, la bobine à entrefer présente l'avantage de ne pas donner naissance à des flux de fuites pouvant produire des inductions gênantes; son emploi est donc à recommander dans la plupart des cas, de préférence même aux bobines à noyau de fer droit.

Si l'on compare l'utilisation d'un circuit magnétique de dimensions

déterminées, d'une part, sous forme de transformateur monophasé à 50 périodes par seconde et, d'autre part, sous forme de bobine d'inductance pour courants redressés, on trouve que les puissances qu'on peut loger sous ces deux formes sont sensiblement égales (en tenant compte du fait que, sur un transformateur de puissance nominale donnée, se trouve logée une puissance apparente double).

LES DIVERS PROCÉDÉS DE FILTRAGE DES COURANTS REDRESSÉS.

La théorie mathématique des divers procédés de filtrage peut être faite en attribuant au redresseur les propriétés suivantes, suffisamment voisines de la réalité :

1° Le courant total débité par le redresseur ne peut s'inverser.

2° Sa force électromotrice est la résultante d'une force électromotrice continue et de forces électromotrices alternatives de fréquences variées, les amplitudes des diverses composantes restant invariables quel que soit le débit.

On peut classer les procédés de filtrage des courants redressés selon la propriété qu'ils utilisent. On est ainsi conduit à distinguer le filtrage par capacité pure des autres procédés, caractérisés par l'emploi d'une inductance parcourue par le courant redressé et d'un circuit à faible impédance placé en dérivation aux bornes du circuit d'utilisation.

Filtrage par capacité pure.

Considérons un redresseur à n phases; nous supposons, comme précédemment, que sa force-électromotrice a comme expressions :

$$e = V \sin \omega t \quad \text{dans l'intervalle de } \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n} \text{ à } \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n}$$

$$e = V \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{n} \right) \quad \text{dans l'intervalle de } \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} \text{ à } \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{n}.$$

Entre les bornes du redresseur, connectons un condensateur de capacité C et un circuit de charge de résistance R . Si le courant total débité par le redresseur ne s'annulait jamais, il ne pourrait se produire de filtrage; celui-ci exige donc que le débit du redresseur soit alternativement positif et nul.

Supposons d'abord que le débit soit positif, et qu'il se produise dans l'intervalle de :

$$\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n} \quad \text{à} \quad \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n};$$

soit i le courant de charge du condensateur, v la différence de potentiels entre ses bornes. I le courant dans la résistance R .

On a :

$$I = \frac{V}{R} \sin \omega t,$$

$$i = \omega C V \cos \omega t.$$

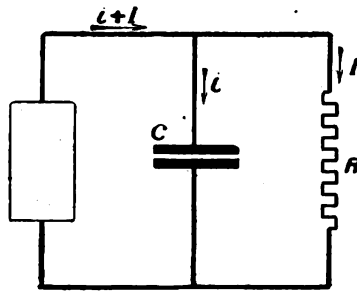


Fig. 12. — Schéma du filtrage par capacité pure.

D'où le courant total débité par le redresseur :

$$i + I = V \left(\frac{1}{R} \sin \omega t + \omega C \cos \omega t \right).$$

Ce régime dure jusqu'à ce que l'on ait $i + I = 0$

ou :

$$\operatorname{tg} \omega t = - R \omega C$$

Désignons par ωt_0 la 1^{re} solution de cette équation en ωt après $\frac{\pi}{2}$; pour que le régime de débit considéré soit possible, c'est-à-dire aussi le filtrage, il faut et il suffit que ωt_0 soit compris entre :

$$\frac{\pi}{2} \quad \text{et} \quad \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n}$$

c'est-à-dire que :

$$R > \frac{1}{\omega C} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n} \right).$$

Cette condition montre que le filtrage par capacité pure ne peut se produire pour un redresseur à n phases qu'au-dessous d'une certaine valeur de sa charge, sauf toutefois pour $n = 2$, auquel cas il y a toujours filtrage.

Le débit du redresseur étant terminé pour $\omega t = \omega t_0$, à partir de ce moment, le condensateur se décharge dans la résistance R ; on a l'équation :

$$v + RC \frac{dv}{dt} = 0.$$

Cette équation s'intègre comme suit, en tenant compte du fait que pour :

$$\omega t = \omega t_0 \quad \text{on a :} \quad v = V \sin \omega t_0,$$

$$v = V \sin \omega t_0 e^{\frac{\omega t_0 - \omega t}{\omega CR}}.$$

La décharge du condensateur cesse et le débit du redresseur reprend pour $\omega t = \omega t_1$ lorsqu'on a :

$$v = V \sin \omega t_0 e^{\frac{\omega t_0 - \omega t_1}{\omega CR}} = V \sin \left(\omega t_1 - \frac{2\pi}{n} \right).$$

La tension aux bornes du circuit d'utilisation a donc la forme de la

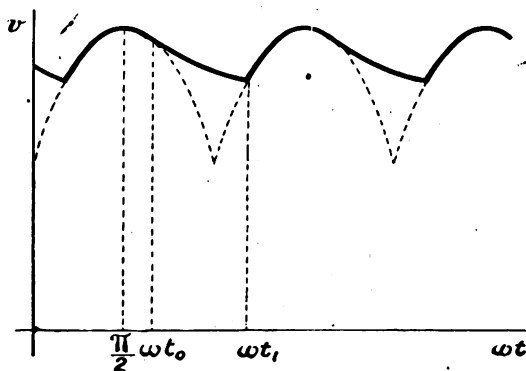


Fig. 13. — Tension aux bornes d'utilisation d'un redresseur filtré par capacité pure.

fig. 13. Comme on le voit, la tension filtrée maximum aux bornes du circuit d'utilisation est : $v_{\max} = V$.

La tension minimum a pour valeur :

$$v_{\min} = V \sin \left(\omega t_1 - \frac{2\pi}{n} \right).$$

On peut se proposer de calculer le rapport :

$$\frac{v_{\min}}{v_{\max}} = \sin \left(\omega t_1 - \frac{2\pi}{n} \right)$$

en procédant comme suit on a l'équation :

$$\sin \omega t_0 e^{\frac{\omega t_0 - \omega t_1}{\omega CR}} = \sin \left(\omega t_1 - \frac{2\pi}{n} \right).$$

D'où l'équation logarithmique :

$$\log \sin \omega t_0 + \frac{1}{2,3} \frac{\omega t_0 - \omega t_1}{\omega CR} = \log \sin \left(\omega t_1 - \frac{2\pi}{n} \right).$$

Pour trouver graphiquement la valeur de ωt_1 , on construira la courbe d'équation :

$$y = \log \sin \left(x - \frac{2\pi}{n} \right) \quad \text{de} \quad x = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} \quad \text{à} \quad x = \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{n}$$

et la droite :

$$y = \log \sin \omega t_0 + \frac{1}{2,3} \frac{\omega t_0 - x}{\omega CR}$$

dont la position ne dépend que de ωCR .

Les coordonnées du point d'intersection fourniront l'abscisse :

$$x = \omega t_1$$

et pour l'ordonnée :

$$y = \log \sin \left(\omega t_1 - \frac{2\pi}{n} \right) = \log \frac{v_{\min}}{v_{\max}}$$

On peut ainsi calculer le rapport $\frac{v_{\min}}{v_{\max}}$, qui peut être pris comme mesure de l'efficacité du filtrage, en fonction de ωCR .

Nous nous bornerons aux résultats numériques concernant le cas d'un redresseur monophasé utilisant les deux alternances ($n = 2$). On obtient ainsi, par application de la méthode précédente, le tableau V.

TABLEAU V. — *Redresseur monophasé utilisant les 2 alternances.*
Valeurs du rapport $\frac{v_{\min}}{v_{\max}}$ en fonction de ωCR

ωCR	2	5	10	15	20	30	50
$\frac{v_{\min}}{v_{\max}}$	0,415	0,648	0,785	0,843	0,877	0,912	0,946

Ces résultats ont été reportés sur la courbe de la fig. 14.

Cette courbe permet le calcul facile de l'effet d'un filtrage par capacité pure.

Prenons l'exemple d'un redresseur destiné à fournir la tension anodique à un poste récepteur de T. S. F. On peut compter $R = 10^4$ ohms au plus. Une capacité $C = 4$ microfarads donnera, pour la fréquence 50 p : s un produit :

$$\omega CR = 314 \times 4 \times 10^4 \times 10^{-6} = 12,5.$$

Cette capacité, placée à la sortie du redresseur, ramènera donc l'ondulation de la tension redressée à une valeur telle que :

$$\frac{v_{\min}}{v_{\max}} = 0,82.$$

En quadruplant cette capacité ($c = 16$ microfarads), on aurait encore :

$$\frac{v_{\min}}{v_{\max}} = 0,946.$$

Le filtrage par capacité pure est donc généralement insuffisant, à lui seul, pour les besoins de la pratique.

On doit remarquer que le filtrage par capacité pure de la tension

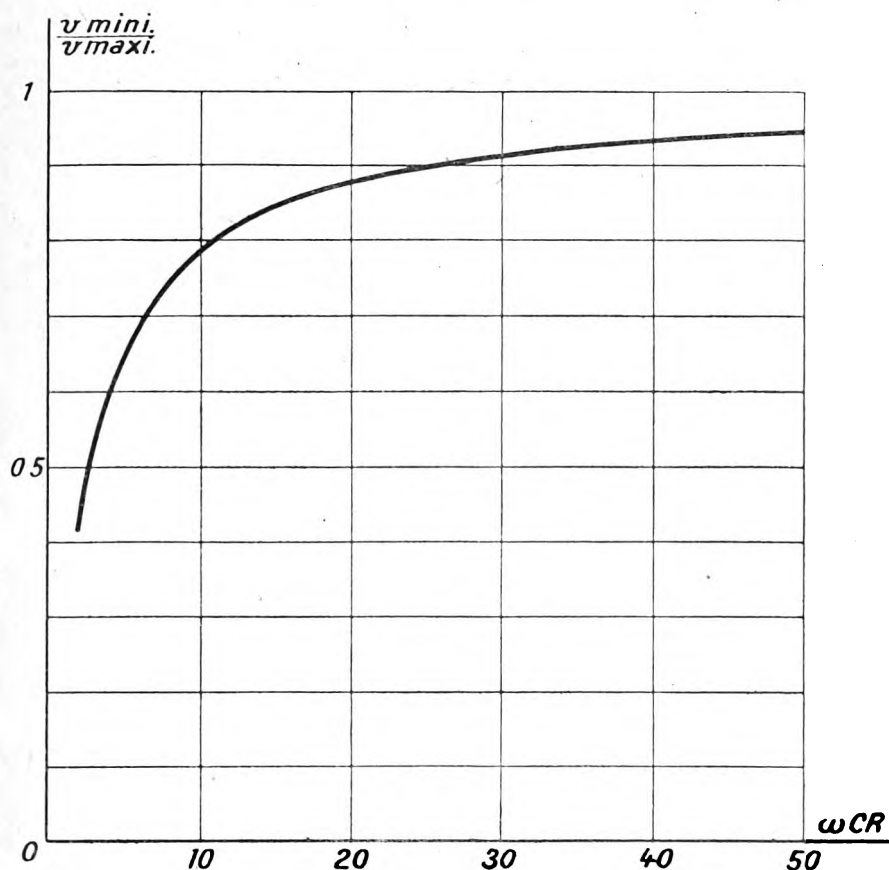


Fig 14. — Traduction graphique du tableau V. — Effet du filtrage par capacité pure.

donnée par un redresseur tend à lever la tension moyenne de celui-ci, en la rapprochant de la tension de crête : en même temps, le redresseur n'ayant plus qu'un débit interrompu, le courant redressé instantané prend des valeurs plus élevées que dans un débit non filtré. Il en résulte sur certains redresseurs une chute de tension s'opposant à son élévation vers la tension de crête.

Le montage du redresseur monophasé dit « en doubleur de tension » comporte une sorte de filtrage par capacité pure, dont la théorie s'établit d'une manière analogue à la précédente.

Filtrage par inductance et faible impédance. — La plupart des procédés pratiques utilisés pour le filtrage des courants redressés se ramènent au schéma général de la fig. 15 : on connecte, en dérivation aux bornes du circuit d'utilisation, un circuit Z présentant par rapport à lui une faible impédance pour les harmoniques à éliminer, et

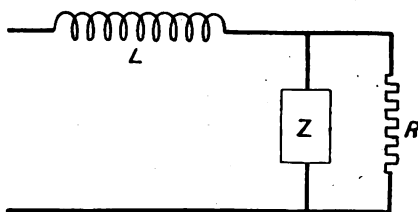


Fig. 15. — Filtrage par inductance et faible impédance.

s'opposant au passage de la composante continue. On réunit l'ensemble au redresseur par une inductance L.

Le circuit Z peut être constitué par l'un des éléments suivants :
 a) par des condensateurs : c'est le type de filtres utilisé le plus fréquemment, on désigne généralement l'ensemble d'une inductance et d'une capacité dans ce montage sous le nom de *cellule* ; on peut, comme nous le verrons faire succéder plusieurs cellules à la sortie d'un redresseur. Nous examinerons séparément les filtres inductance-capacité à une et à plusieurs cellules.

b) Par des circuits résonants accordés sur les fréquences à éliminer ; on a alors les filtres à résonance.

c) Par une batterie d'accumulateurs, on a alors le filtrage par batterie-tampon.

Filtres inductance-capacité à une seule cellule. — Considérons un redresseur débitant sur un circuit de résistance R par l'intermédiaire d'une cellule formée d'une inductance L et d'une capacité C ; supposons développée en série de Fourier la force électromotrice du redresseur ; considérons l'harmonique de pulsation ω ; soit U sa tension maximum avant filtrage, u aux bornes du circuit d'utilisation, c'est-à-dire après filtrage. On établit facilement la formule :

$$\frac{U}{u} = \sqrt{(\omega^2 LC - 1)^2 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}. \quad (1)$$

Nous désignerons ce rapport sous le nom de *rapport d'étouffement*; on voit qu'il dépend de la résistance du circuit d'utilisation : il croît lorsque celle-ci diminue. On a donc :

$$\frac{U}{u} > \omega^2 LC - 1.$$

donc on se propose d'obtenir une valeur du rapport d'étouffement

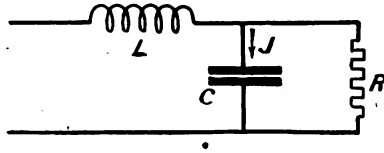


Fig. 16. — Filtre inductance-capacité.

supérieure ou égale à une valeur ε , il suffit de choisir :

$$\omega^2 LC - 1 = \varepsilon \quad (2)$$

L'étouffement réel obtenu sera sûrement supérieur à cette valeur, nous désignerons la quantité $\omega^2 LC - 1$ sous le nom de *rapport d'étouffement de la cellule*.

Une cellule de filtre constitue un circuit oscillant ayant une pulsation propre :

$$\Omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Le rapport d'étouffement pour une pulsation ω de la cellule de pulsation propre Ω a pour expression :

$$\varepsilon = \frac{\omega^2}{\Omega^2} - 1.$$

Pour qu'une cellule de filtre étouffe réellement la pulsation ω , il faut et il suffit que l'on ait $\varepsilon > 1$, c'est-à-dire :

$$\frac{\omega^2}{\Omega^2} > 2$$

ou :

$$\omega > \Omega\sqrt{2}.$$

Tous les harmoniques de pulsation supérieure à $\Omega\sqrt{2}$ seront donc étouffés, les autres seront amplifiés.

Ainsi, la pulsation propre d'une cellule de filtre devra être choisie inférieure à $\frac{\omega}{\sqrt{2}}$, ω désignant la plus faible pulsation présente dans la tension redressée à filtrer.

L'étouffement de l'harmonique de pulsation ω se produit par l'inter-

médiaire d'un courant de circulation dérivé par le condensateur, et donnant lieu à une chute de tension dans l'inductance L , la valeur de ce courant est :

$$J = u \sqrt{\omega^2 C^2 + \frac{1}{R^2}} = U \frac{\sqrt{\omega^2 C^2 + \frac{1}{R^2}}}{\sqrt{\frac{\omega^2 L^2}{R^2} + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

Les divers harmoniques de la tension redressée donnent lieu chacun à un courant de circulation; tous ces courants s'ajoutent au courant continu débité par le redresseur. Supposons que R augmente, c'est-à-dire que la charge diminue, chacun des courants de circulation tend vers la limite :

$$J = \frac{\omega CU}{\omega^2 LC - 1}.$$

Il arrive un moment où la valeur maximum de la résultante de ces courants devient égale à la composante moyenne du courant redressé; si on diminue encore la charge, comme le courant total débité par le redresseur ne peut s'inverser, les formules précédentes ne s'appliquent plus.

Nous voyons donc qu'au-dessous d'une certaine charge, que nous appellerons *charge critique*, le mécanisme du filtrage change, et devient analogue à celui du filtrage par capacité pure, le redresseur n'ayant plus alors qu'un débit interrompu.

La tension moyenne aux bornes du circuit d'utilisation, qui est sensiblement constante pour les charges supérieures à la charge critique s'élève pour les charges inférieures à celle-ci jusqu'à la tension de crête.

Cherchons maintenant à calculer la valeur de la charge critique; considérons un redresseur à n phases ayant la forme de tension redressée type. Le premier harmonique de la tension redressée ayant pour pulsation ω , l'harmonique de rang p a la pulsation $p\omega$; il donne lieu à la composante :

$$J_p = \frac{2U_c}{p^2 n^2 - 1} \frac{1}{p\omega L - \frac{1}{p\omega C}}$$

J_p décroît donc très rapidement lorsque p croît, et on peut se borner, en première approximation, pour la valeur de la charge critique, à l'amplitude de la composante de courant du premier harmonique, soit :

$$J = \frac{2U_c}{n^2 - 1} \frac{\omega C}{\omega^2 LC - 1}.$$

Introduisons le courant continu correspondant à la pleine charge; on

a : $U_c = RI_c$, R désignant la résistance du circuit de débit. On en déduit :

$$\frac{J}{I_c} = \frac{2\omega CR}{(n^2 - 1)(\omega^2 LC - 1)}.$$

Cette équation nous montre que la charge critique d'un redresseur déterminé fonctionnant sur une cellule de filtre de pulsation propre constante est d'autant plus élevée que la capacité utilisée est plus grande. Pour un nombre de phases et un étouffement déterminés la charge critique ne dépend que de la quantité ωCR .

Il importe de tenir compte de la valeur de la charge critique dans les applications ; en effet, au dessous de cette valeur, la tension aux bornes du circuit d'utilisation s'élève brusquement, et il peut en résulter des perturbations : on devra donc généralement choisir la charge critique suffisamment faible, pour qu'elle soit toujours inférieure à la charge du redresseur.

L'étude mathématique du filtrage au-dessous de la charge critique présente de grandes difficultés ; nous la laisserons de côté, les considérations précédentes suffisant d'ailleurs aux besoins pratiques.

Nous examinerons encore une cellule de filtre au point de vue de ses régimes transitoires. Soit e la force électromotrice instantanée du redresseur, v la tension instantanée aux bornes du condensateur. On a :

$$e = L \frac{dI}{dt} + L \frac{dJ}{dt} + v,$$

$$v = RI, \quad C \frac{dv}{dt} = J,$$

d'où l'équation différentielle de la tension aux bornes du circuit d'utilisation :

$$LC \frac{dv^2}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dv}{dt} + v = e.$$

On peut, en première approximation, négliger la partie variable de e , et poser $e = U_c$. L'équation peut alors se mettre sous forme réduite, en effectuant le changement de variables suivant :

$$y = \frac{v}{U_c}, \quad x = \frac{t}{\sqrt{LC}}.$$

On obtient alors l'équation réduite :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + 2a \frac{dy}{dx} + y = 1$$

en posant :

$$2a = \frac{L}{R} \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{LC}}{CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

On voit que la façon dont une cellule de filtre se comporte en régime variable dépend de la quantité :

$$a = \frac{\sqrt{LC}}{2CR} = \frac{1}{2\Omega CR}$$

qui est le *degré d'amortissement* du système formé par la cellule et le circuit de débit.

En précisant convenablement les conditions initiales, on peut discuter diverses formes de régimes transitoires, en particulier l'établissement et la rupture de la charge à travers la cellule.

La considération du degré d'amortissement d'une cellule de filtre présente souvent une grande importance, en particulier dans le cas des redresseurs destinés à l'alimentation des postes émetteurs de télégraphie sans fil rapide, ou de téléphonie sans fil à grande amplitude de modulation, pour lesquels le circuit de plaque présente des variations de résistance très rapide; la discussion montre que les signaux sont d'autant plus déformés que le degré d'amortissement de la cellule est plus grand : il convient donc, dans ce cas, de le choisir suffisamment petit pour maintenir la déformation des signaux à une valeur acceptable.

Cherchons enfin à évaluer le prix de revient d'une cellule de filtrage; elle se compose de deux éléments : bobine d'inductance et condensateur. Le prix de revient de la bobine d'inductance est, comme nous l'avons vu plus haut, fonction de LI_c^2 , et on peut admettre en première approximation, la proportionnalité à cette quantité.

De même, on peut admettre pour le condensateur un prix de revient proportionnel à CU_c^2 .

Le prix de revient de la cellule est donc de la forme :

$$x = ALI^2 + BCU^2.$$

Proposons-nous d'abord de choisir L et C de manière à obtenir le prix de revient minimum, tout en conservant constant le rapport d'étouffement, donc aussi le produit LC; le prix de revient total est alors la somme de deux termes dont le produit est constant.

On obtiendra donc le prix de revient minimum lorsqu'il y aura égalité entre le prix de la bobine d'inductance et celui du condensateur.

On aura ainsi :

$$L = \frac{R}{\Omega} \sqrt{\frac{B}{A}}$$

$$C = \frac{1}{R\Omega} \sqrt{\frac{A}{B}}$$

Ω étant la pulsation propre du filtre,

$$\Omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

et l'expression du prix de revient minimum de la cellule sera :

$$\frac{2}{\Omega} U_c I_c \sqrt{AB}.$$

La considération du prix de revient minimum n'est pas toujours prépondérante dans le choix des quantités L et C ; ce choix peut être imposé au contraire par celui de la charge critique, imposant d'ailleurs celui du degré d'amortissement. Supposons donc connu ce dernier, on a :

$$a = \frac{1}{2\Omega CR}$$

On en déduit les valeurs de C et L ,

$$C = \frac{1}{2aR\Omega},$$

$$L = \frac{1}{\Omega^2 C} = \frac{2aR}{\Omega}.$$

D'où :

$$x = A \cdot \frac{2a}{\Omega} R I_c^2 + B \cdot \frac{1}{2a\Omega} \frac{U_c^2}{R} = \frac{U_c I_c}{\Omega} \left(2aA + \frac{B}{2a} \right).$$

Le prix de revient d'une cellule de filtre varie donc, à degré d'amortissement égal, proportionnellement à sa période propre, et à la puissance filtrée.

Les règles précédentes, relatives au prix de revient d'une cellule de filtre ne représentent d'ailleurs qu'une première approximation; en réalité, la croissance du prix de revient en fonction de la puissance est moins rapide que la proportionnalité.

Filtres inductance-capacité à deux ou plusieurs cellules. — Disposons maintenant à la sortie d'un redresseur deux cellules successives. Désignons par L_1 et C_1 les constantes de la première, par L_2 et C_2 celles de la seconde.

Soit U la tension maximum de l'harmonique de pulsation ω , donné par le redresseur, u sa tension aux bornes du circuit d'utilisation, constitué par la résistance R . On a, pour le rapport d'étouffement la formule suivante :

$$\frac{U}{u} = \sqrt{[(\omega^2 L_1 C_1 - 1)(\omega^2 L_2 C_2 - 1) - \omega^2 L_1 C_2]^2 + \left(\frac{\omega L_1 + \omega L_2 - \omega^3 L_1 L_2 C_1}{R^2} \right)^2}.$$

On voit que dans le cas d'un filtre à deux cellules comme dans le cas

d'un filtre à cellule unique, le rapport d'étouffement augmente lorsque la résistance du circuit d'utilisation diminue. Si donc on veut qu'il soit inférieur à une valeur ε , il suffit de choisir :

$$(\omega^2 L_1 C_1 - 1)(\omega^2 L_2 C_2 - 1) - \omega^2 L_1 C_2 = \varepsilon.$$

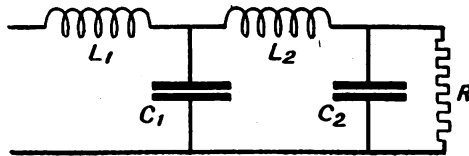


Fig. 17. — Filtre à deux cellules.

On a généralement le droit de négliger le terme $\omega L_1 C_2$, de sorte qu'on peut poser avec une approximation suffisante :

$$\varepsilon = (\omega^2 L_1 C_1 - 1)(\omega^2 L_2 C_2 - 1).$$

Le rapport d'étouffement d'un filtre à deux cellules pour la pulsation ω est donc sensiblement égal au produit des rapports d'étouffement de ses deux cellules pour cette même pulsation.

La même règle s'applique à un filtre à plusieurs cellules, chaque cellule se comportant à peu près comme si elle était seule. Il en résulte que la règle relative au choix de la pulsation propre des cellules établie pour une seule d'entre elles, s'applique encore ici : on devra prendre pour chacune une pulsation propre inférieure à $\frac{\omega}{\sqrt{2}}$, ω désignant la plus faible pulsation présente dans la tension redressée à filtrer.

Dans le cas d'un filtre à deux ou plusieurs cellules, on doit encore considérer une *charge critique*, au-dessous de laquelle le mécanisme du filtrage change, le redresseur n'ayant plus qu'un débit interrompu. On voit facilement que la première cellule joue un rôle prépondérant dans la détermination de la charge critique : en effet, comparons les impédances du condensateur C_1 et de la seconde cellule pour la pulsation ω . Le rapport de ces deux impédances est :

$$\frac{\frac{1}{\omega C_1}}{\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}} = \frac{\frac{\omega C_2}{\omega C_1}}{\omega^2 L_2 C_2 - 1}.$$

Le numérateur est, en général, peu différent de l'unité et le dénominateur est grand. On peut donc négliger le courant dérivé par la 2^e cellule et admettre que la charge critique est due au premier harmo-

nique circulant dans la première cellule. On a donc pour sa valeur :

$$\frac{J}{I_c} = \frac{2\omega C_1 R}{(n^2 - 1)(\omega^2 L_1 C_1 - 1)}.$$

La tension redressée à la sortie du filtre, sensiblement constante au-dessus de la charge critique, s'élève donc au-dessous de cette charge, jusqu'à la tension de crête, atteinte pour une charge nulle.

Il peut arriver que la première cellule de filtrage se réduise à une capacité pure ; on a alors un *filtre avec condensateur d'entrée* ; ce montage est souvent employé avec les redresseurs monophasés utilisant les deux alternances ; le filtre fonctionne alors toujours au-dessous de la charge critique. Le calcul complet, relatif à son fonctionnement, est très compliqué ; pratiquement, on obtient une limite supérieure de l'ondulation en supposant que le condensateur d'entrée se décharge directement dans la résistance de charge ; la courbe de la figure 14 renseigne sur l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur d'entrée ; on peut ensuite facilement en déduire le filtrage final ; cette méthode, bien qu'assez grossière, peut suffire pratiquement.

Quant aux régimes variables des filtres à plusieurs cellules, leur étude mathématique est également très complexe ; pratiquement, c'est la dernière cellule du filtre qui joue un rôle prépondérant, et c'est son degré d'amortissement qu'on devra surtout considérer.

Dans quel cas doit-on employer des filtres inductance-capacité ?

Il suffit pour s'en rendre compte d'examiner le schéma d'une cellule, on voit alors qu'il faut que la résistance R du circuit de charge soit suffisamment grande pour qu'on puisse réaliser facilement un condensateur dont l'impédance $\frac{1}{\omega C}$ pour la pulsation à étouffer soit petite devant R . Au cas contraire, dans la formule donnant l'étouffement par une cellule :

$$\frac{U}{u} = \sqrt{(\omega^2 LC - 1)^2 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}$$

le terme $\frac{\omega^2 L^2}{R^2}$ devient du même ordre que $(\omega^2 LC - 1)^2$, c'est-à-dire que l'étouffement varie fortement en fonction de la charge.

Si la résistance devenait de plus en plus faible, on trouverait à la limite la formule donnant l'étouffement par inductance pure :

$$\frac{U}{u} = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}.$$

L'emploi des filtres inductance-capacité est donc limité au cas où

l'on peut réaliser facilement une impédance $\frac{1}{\omega C}$ du condensateur très inférieure à la résistance du circuit de débit.

On peut, en particulier, employer les filtres à cellules pour des redresseurs débitant sur des circuits à forte résistance tels que les circuits de plaque des triodes; on peut également les utiliser dans le cas des redresseurs débitant sur des circuits à très basse tension, même si la résistance de ceux-ci est faible, car on peut alors employer des condensateurs électrolytiques permettant d'obtenir économiquement d'énormes capacités; on a pu ainsi réaliser des filtres à cellules permettant l'alimentation directe des circuits de chauffage des postes récepteurs de T.S.F.

Pour des tensions plus élevées et des circuits de charge peu résistants, on doit abandonner le filtre à cellules et faire appel aux filtres à résonance.

Filtres à résonance. — Un filtre à résonance, destiné à éliminer un harmonique de pulsation ω , se compose d'une bobine d'inductance L placée dans le circuit du redresseur et d'un circuit résonant formé

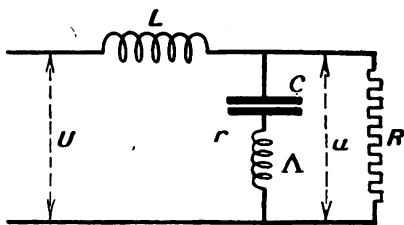


Fig. 18 — Filtre à résonance.

d'une bobine d'inductance Λ et d'une capacité c , placé en dérivation aux bornes du circuit d'utilisation et accordé sur la pulsation ω .

Supposons l'accord parfait; l'impédance du circuit résonant se réduit à une résistance r et on a, pour la formule donnant le rapport d'étouffement :

$$\frac{U}{u} = \sqrt{1 + \omega^2 L^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right)^2}.$$

Là encore, si R diminue, le rapport d'étouffement augmente. d'où il résulte que, pour réaliser à l'aide d'un filtre à résonance, un rapport d'étouffement inférieur à une valeur ε , il suffit de prendre :

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{r^2}}.$$

S'il existe dans la force électromotrice du redresseur plusieurs harmoniques gênants, on pourra les éliminer individuellement en disposant plusieurs circuits résonants accordés aux bornes du circuit d'utilisation.

L'emploi d'un filtre à résonance suppose réalisées plusieurs conditions :

a) La fréquence d'alimentation du redresseur doit être invariable; toutefois, les résonances utilisées sont en général suffisamment aplaties pour qu'on puisse admettre les variations de fréquence qu'on rencontre sur les réseaux d'alimentation.

b) Il faut qu'on puisse réaliser des résistances de circuits résonants très inférieures à celle du circuit d'utilisation. La résistance du circuit résonant comprend deux parties : celle due aux pertes diélectriques dans le condensateur et la résistance ohmique de la bobine d'inductance Λ .

Considérons d'abord la résistance équivalente aux pertes diélectriques du condensateur, la tension appliquée à celui-ci résulte de la superposition de la tension redressée moyenne et de la tension de résonance de l'harmonique considéré. Lorsqu'un condensateur est soumis à une tension alternative simple, la résistance équivalente à ses pertes diélectriques varie seulement avec la fréquence à laquelle elle est proportionnelle. Lorsqu'on superpose à cette tension alternative une tension continue fixe, l'expérience montre que *la résistance équivalente aux pertes diélectriques est accrue dans des proportions considérables*.

Avant l'établissement d'un filtre à résonance, il importe donc de mesurer avec soin les pertes du type de condensateur adopté dans les conditions d'emploi.

En ce qui concerne la bobine d'inductance Λ , on doit la constituer par une bobine sans fer, en deux ou plusieurs galettes permettant l'accord exact de la résonance. Il importe, dans le calcul de sa résistance, de *tenir compte des courants de Foucault*, ou mieux, de les rendre négligeables par l'emploi de fil divisé. Quant aux dimensions à adopter pour cette bobine, on voit facilement qu'elles ne dépendent que du rapport de l'inductance à la résistance ohmique.

La bobine d'inductance du circuit à courant redressé sera constituée par une bobine à entrefer. Les dimensions adoptées pour les trois organes L , Λ et C , doivent être choisies pour assurer un prix de revient aussi faible que possible, tout en conservant la même valeur du rapport d'étouffement.

Nous avons pu réaliser ainsi, en particulier, des installations de ce

genre sur trois sous-stations de redresseurs à ampoules de verre, alimentant une ligne de tramways à Birmingham et débitant chacune 1 200 ampères sous 600 volts. La fréquence du courant alternatif d'alimentation de ces sous-stations est de 25 périodes par seconde et les

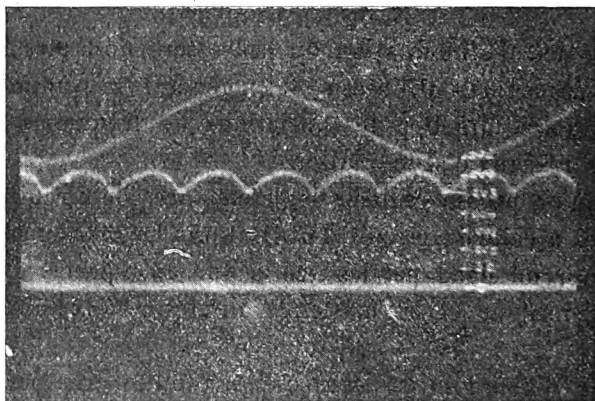


Fig. 19. — Oscillogramme de tension redressée non filtrée.

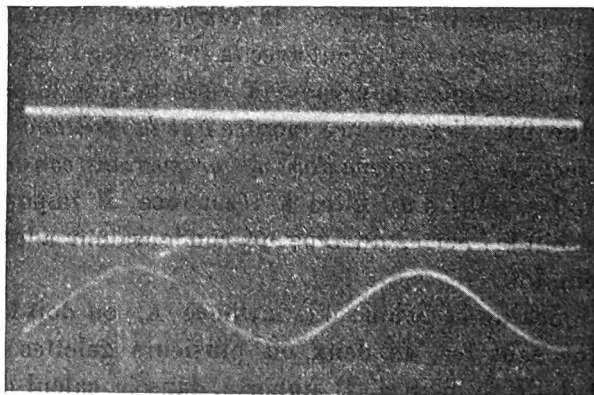


Fig. 20. — Oscillation de tension redressée filtrée.

redresseurs sont hexaphasés ; le courant redressé renferme donc une composante de fréquence 150 et des composantes de fréquences multiples. La ligne de contact des tramways alimentés par ces sous-stations longe pendant plusieurs kilomètres une série de lignes téléphoniques sur lesquels se manifestait une influence gênante. Cette influence a été éliminée par l'installation, dans chaque sous-station, d'un filtre à résonance comprenant une bobine d'inductance parcourue par le cou-

rant redressé, et deux circuits résonants, accordés respectivement sur les fréquences 150 et 300.

Les figures 19 et 20 montrent des oscillogrammes pris sur l'une de ces sous-stations, avant et après filtrage. La courbe supérieure représente sur ces deux figures la sinusoïde d'alimentation, les courbes médianes représentent les courbes de tension redressée avant et après filtrage, la ligne de zéro étant la droite horizontale inférieure. On voit que la tension filtrée est très peu ondulée ; en fait, la gêne produite sur les téléphones par les redresseurs a complètement disparu après l'installation de ces filtres.

Filtrage par batterie-tampon. — Supposons qu'une batterie d'accumulateurs soit chargée en permanence par un redresseur et qu'on se propose de l'utiliser, sans interrompre la charge, à un usage demandant une tension très peu ondulée. Il suffira, dans ce cas, d'intercaler entre le redresseur et la batterie une inductance L ; si on désigne par r la résistance intérieure de la batterie, l'harmonique de pulsation ω sera étouffé aux bornes de celle-ci dans le rapport :

$$\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}.$$

Ce genre de filtrage se rencontre fréquemment dans les centraux téléphoniques.

Nous terminerons ici cette revue rapide des différents modes de filtrage des courants redressés.

La présente étude n'a pas la prétention d'épuiser le sujet. Nous avons voulu simplement donner une vue d'ensemble de la question, en insistant tout particulièrement sur le calcul des éléments des filtres à courants redressés, en particulier des bobines d'inductance à entrefer, dont les conditions spéciales de fonctionnement n'avaient pas, jusqu'ici, fait l'objet de publications. Nous espérons que les données théoriques et pratiques que nous avons pu réunir pourront être de quelque utilité aux nombreux techniciens qui s'intéressent à la question du filtrage des courants redressés.

DE L'UNIVERSALITÉ NÉCESSAIRE DU SYSTÈME MÉTRIQUE ABSOLU⁽¹⁾

**Les divers systèmes métriques absolus et leurs unités.
L'avenir incertain du système centimétrique.**

par M. F. BAYLE.

La présente note, dans sa première forme, avec ses annexes, les observations de M. Guillaume et ma réponse, avait une quarantaine de pages que l'importance universelle du sujet paraissait justifier ; pour la ramener à sa dimension actuelle, j'ai éliminé autant que possible le côté théorique, qui se défend seul, pour ne conserver que les considérations extra scientifiques et psychologiques, à mon avis les plus importantes et qui, elles, ont besoin d'être défendues.

Une grande idée française.

Quelle fut la préoccupation dominante des créateurs du système métrique décimal du 18 germinal an III, 4 messidor an VIII, 19 frimaire an VIII, de la première République Française? Incontestablement, semble-t-il, cette préoccupation principale fut de créer un système de mesures simple, pratique, à la portée de tous les hommes, décimal, unique et d'usage universel, pour le commerce, l'industrie, la science.

Ont-ils entièrement réussi? Non, puisque l'on connaît à l'heure actuelle, au moins deux systèmes qui, eux aussi, prétendent à l'usage international d'abord, pour les savants, puis, ensuite à l'usage universel pour tous les hommes : le système C. G. S. proposé par lord KELVIN⁽²⁾ et adopté en 1881 par le Congrès International des Electriciens, et le système M. T. S. proposé par M. Ch. LALLEMAND et sanctionné par la loi française du 2 avril 1919. Ces systèmes ont-ils des chances de réaliser cette ambition, et de supplanter le système métrique? Ni l'un ni l'autre; je vais le montrer.

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre le Samedi 26 octobre 1929.

(2) Lord KELVIN et M. Ch. LALLEMAND travaillèrent surtout à faire prévaloir les systèmes C.G.S. et M.T.S. Voir plus loin les observations de M. Ed. GUILLAUME.

Les causes de l'échec du premier système métrique.

Les unités principales de l'ancien système métrique étaient :

<i>Natures des grandeurs</i> :	Longueur	Force	Temps.
<i>Dimensions des unités</i> :	Mètre	Kilogramme	Seconde.

La cause de l'échec, dans le passé, de ce système fut la définition à la fois insuffisamment précise et insuffisamment générale de la dimension physique de l'unité de poids, ou de force, le Kilogramme, qui faisait de celle-ci une unité de *dimension relative* au lieu géographique. On sait que le Mètre avait une définition soi-disant théorique : c'était la dix-millionième partie du demi-méridien terrestre (1); pratiquement le Mètre avait la dimension de l'étalon à bouts déposé le 1 messidor an VIII, aux Archives de France; puis le 26 septembre 1889, il fut admis que le Mètre aurait pour nouvelle dimension la distance entre les traits de la règle de Tresca; cette dimension a une histoire géodésique, mais c'est en réalité une dimension arbitraire, commode pour la généralité des usages, une dimension humaine convenant bien pour la pratique, par suite d'un choix heureux et raisonné.

De même la dimension physique de l'unité de force, le Kilogramme, avait une définition théorique; c'est le poids d'un certain volume, le décimètre cube, d'une certaine matière, l'eau pure, à son maximum de densité.

Cette force unité était la grandeur physique que nous savons être le poids d'une certaine masse de matière physiquement déterminée, mais non mesurée sauf, naturellement, par rapport à elle-même, ce qui n'est pas considéré, en général, comme une mesure proprement dite. A l'époque de la création du système métrique on disait que la masse d'un corps était un coefficient m caractéristique de ce corps, de valeur numérique égale à P/g ; les seules unités mises en jeu pour déterminer ce soi-disant coefficient, on le voit clairement, étaient les trois unités fondamentales du système métrique, les unités de force, de longueur et de temps; il n'était pas question d'unité de masse (2).

Mais pour connaître le Kilogramme, en grandeur ou dimension physique, il fallait que le savant, l'expérimentateur, aient à leur disposition un décimètre-cube d'eau pure à son maximum de densité; cette

(1) A l'instar des navigateurs j'appelle méridien un demi grand cercle.

(2) Ce point est contesté : voir plus loin.

quantité de matière était une masse de référence fort incommode, et très difficile à reproduire. LEFÈVRE-GINEAU et FABRONI, après des expériences de haute précision pour l'époque, trouvèrent que le poids du décimètre cube d'eau, à Paris, était de 18 827, 15 grains. (Ch. Ed. GUILLAUME).

Un bloc de platine fut construit et ajusté par le constructeur FORTIN pour représenter ce poids, en *permanence*, aussi bien que possible; ce fut là aussi un travail matériel de haute précision. Dès lors l'unité de force, le Kilogramme, était le poids à Paris d'un certain bloc de matière, imparfaitement définie chimiquement, le bloc Fortin; le Kilogramme devenait donc, en réalité, lui aussi, une unité de force de dimension arbitraire, le poids à Paris d'une certaine quantité de matière de nature quelconque, quantité non mesurée, mais physiquement déterminée; cette masse de platine faisait équilibre, à la balance, dans le vide, à très peu près, à une autre masse d'eau pure du volume de un décimètre-cube, masse qui faisait elle-même à peu près équilibre à une autre masse de 18 827, 15 grains, d'après les étalons de l'époque.

Cet équilibre à la balance fut réalisé à Paris, lieu des expériences, mais il aurait existé aussi partout d'ailleurs; car c'était un équilibre entre des masses.

Puisqu'on voulait déterminer la dimension physique invariable de l'unité de poids ⁽¹⁾ et fixer son étalon, force était bien d'avoir recours

(1) Les maîtres de l'enseignement appellent abusivement les pesants commerciaux, des poids, de sorte que les enfants de France sont, jusqu'à un âge avancé, littéralement abrutis par ce langage amphigourique : les poids des poids. Il faut dire : les poids des pesants ; avec plus de précision : les poids de un, cinq, dix kilogrammes, des pesants de un, cinq, dix Fortins. Et encore le mot pesant convient-il mal à cause de sa racine. De tout temps, chez tous les peuples, depuis les plus lointaines origines de la science, à la balance, on pèse. Autrement dit, on mesure des poids avec des unités de force que l'on croyait absolues, mais qui n'étaient que relatives au lieu géographique.

Depuis Newton, on *pèse* en unités relatives de force et, simultanément, on *masse* en unités *absolues* de masse ; cette double mesure en une seule opération n'était connue que des initiés. Mais depuis l'introduction officielle des systèmes absolus C.G.S. et M.T.S., il est absurde, tout le monde le sait, de dire : je pèse ; c'est même légalement défendu, ce dont l'Université se s'embarrasse guère.

À la balance, avec ces systèmes, on ne peut pas peser, on ne peut que masser, car on masse juste, tandis qu'on pèse avec de faux poids.

Donc aujourd'hui pour désigner les blocs étalonnés, au laboratoire comme chez l'épicier, c'est « massant », qui vient de masser, et non « pesant », qui vient de peser, qu'on devrait dire. En l'absence du mot propre nécessaire, on continue à dire, dans l'enseignement : je pèse, pour : je masse, et ainsi on propage officiellement une ineptie. En effet, si le savant sait qu'il masse, s'il ne trompe pas son collègue, en disant : je pèse, le professeur et l'instituteur, au contraire, introduisent une erreur dans l'esprit des étudiants, d'où elle ne sortira que lentement, et dans celui des écoliers, d'où elle ne sortira jamais. Le fameux cri : Peuple, les maîtres te trompent, ne fut jamais mieux à sa place qu'ici.

La langue scientifique est naturellement une langue mal faite ; M. le Profes-

à l'attraction de la Terre sur une masse de matière déterminée; un ressort ne convenait pas pour cet usage, en raison de l'incertitude de la permanence des propriétés élastiques du métal.

Un écolier, seul, pourrait avoir l'outrecuidance de supposer que les savants français qui s'occupaient de ces questions de métrologie, ignoraient que le poids du bloc Fortin varie avec sa position géographique, puisque des travaux approfondis avaient déjà vu le jour sur le pendule et le calcul de l'accélération de la pesanteur. Il était donc entendu par ces savants, que le Kilogramme était le poids du bloc Fortin à Paris.

Cependant ils ne l'ont pas écrit expressément; pourquoi ce silence? Un instant de réflexion montre que c'est forcément un silence de discrétion, afin de ne pas introduire officiellement, dans le système métrique, une définition expérimentale propre à un lieu géographique particulier, ce qui était contraire à leur intention de généralité universelle. Tout ce que l'on peut inférer de ce silence forcément volontaire, c'est qu'ils n'ont pas songé à lever la difficulté à l'aide d'une autre définition du Kilogramme, comme celle que nous proposons plus loin. Ou encore, y ayant songé, ils ont délibérément repoussé cette idée, préférant le silence; cela est possible, presque probable.

D'ailleurs la définition géographique particulière propre à Paris, devint par la suite, encore plus particulière : « Dans l'ancien système, le Kilogramme était la force exercée verticalement, en un point déterminé de la Terre, le coffre-fort des étalons, aux Archives de France, par un morceau de métal en repos. » (Ch. Ed. GUILLAUME).

Or tous les savants, et même tous les hommes ont besoin de connaître l'étalon de force; il est facile de délivrer aux laboratoires nationaux des copies très approchées du bloc de matière dont le poids à Paris est de un kilogramme. Mais pour connaître la grandeur physique du Kilogramme en tous lieux, il faut multiplier le poids local de ce bloc, en kilogrammes de Paris, par le rapport g/g' , g et g' étant les accélérations de la pesanteur au lieu de l'expérience et à Paris. Or g et g' sont deux nombres expérimentaux qui comportent forcément deux erreurs expérimentales. Le nombre g pouvait être déterminé par chaque savant personnellement, dans son laboratoire; pour g' , il fallait

seur BOUASSE en a donné la raison : pour exprimer une idée scientifique nouvelle, d'ailleurs souvent peu claire à l'origine, presque toujours, par prudence, on se borne à surcharger un ancien mot d'un sens nouveau, et alors pendant des siècles, c'est le cas ici, le populaire est trahi par une langue savante trop riche en nuances. Si pour éviter l'amphibologie, on forge un néologisme, les linguistes gémissent ; il n'est jamais ni assez bon, ni assez beau, ni assez court, ni assez sonore, ni assez classique, etc., à leur gré.

accepter les mesures des savants français, et leurs erreurs, s'ils en commettaient. A défaut, pour vérifier, comme il est de règle de vérifier toute mesure expérimentale, le savant étranger devait venir lui-même déterminer g à Paris; c'était une lourde sujétion. Mais lorsque l'unité de force fut le poids d'un morceau de matière dans l'armoire des Archives de France, la vérification devenait impossible; la situation faite aux savants étrangers était intolérable. La définition de l'unité de force du système métrique était mauvaise; il fallait la changer, et cela fit sombrer le système métrique ancien, en qualité de système universel.

Les trois grandeurs fondamentales.

Comme nous venons de le voir, les unités principales de l'ancien système métrique étaient les unités de longueur, de force et de temps. Ces trois unités étaient connues en grandeur, ou *dimension physique*, chacune par son étalon, le Mètre, le Kilogramme et le Jour sidéral ⁽¹⁾; les *dimensions physiques* de ces unités, en raison des considérations précédentes, étaient et sont encore trois *dimensions* arbitraires, quoique judicieusement choisies. Elles sont arbitraires les unes par rapport aux autres, dans le fait, par suite de la construction matérielle de la règle métallique de Tresca, pour le Mètre, et du bloc Fortin pour le Kilogramme, mais elle ne l'étaient pas dans l'intention des savants de l'an III; un instant de réflexion le montre d'une façon éclatante. En effet, en principe, on voulait que les forces aient les mêmes mesures que les volumes d'eau pure :

$$1[F] = 1\left[\frac{F}{L^3}\right] \times v[L^3]$$

Equation dite aux dimensions : $1[F] = 1[L^3]$.

De même que, théoriquement, la dimension de l'unité de force dérivait, en intention, de la dimension de l'unité de longueur, si la question des unités avait été posée comme je le fais ici, on eut pu, en partant de l'étalon de temps sidéral, choisir une unité usuelle, aliquote du jour sidéral (ou du jour solaire moyen) dont la dimension aurait dérivé, théoriquement, de la dimension physique de l'unité de longueur, et cela de diverses manières; j'en ai indiqué deux ailleurs; en voici une troisième. On sait que l'on a, sur un grand cercle terrestre :

(1) En réalité, l'étalon usuel de temps est le jour solaire moyen ; mais le jour sidéral est de définition plus facile ; il vaut 86164,09 secondes de temps moyen.

$1[\text{Mille marin}] = 4[\text{Secondes sexagésimales de temps moyen}] = 1[\text{Minute sexagésimale d'angle}]$.

Avec une circonférence de grand cercle de 40 000 Km, en divisant le jour comme le cercle, en quatre quadrants de 100 grades, on eut eu :

$$1[\text{Kilomètres}] = 1\left[\frac{\text{K}}{\text{S}}\right] \times s[\text{secondes centésimales de temps moyen}]$$

Equation des dimensions des unités : $1[\text{L}] = 1[\text{T}]$.

Dans ces conditions, la mesure d'une certaine grandeur Y , de nature quelconque, et d'unité $[Y]$, fournirait l'équation aux dimensions simplifiées suivantes, *la même pour toutes les grandeurs usuelles* :

$$1[Y] = 1[\text{L}^n].$$

L'exposant n serait, selon le cas : positif, négatif, entier, fractionnaire, ou nul très souvent. Je n'insiste pas; je laisse aussi de côté les formes de certaines fonctions transcendantes ⁽¹⁾. Naturellement, au lieu de prendre comme unité première unique, l'unité de longueur, on pourrait prendre, théoriquement, une unité de nature physique quelconque, l'unité de chaleur, ou telle autre, à volonté.

J'estime ce que je viens de dire indispensable pour détruire l'absurde légende qui affirme que le choix de trois unités fondamentales est basé sur l'irréductibilité de la nature de ces trois grandeurs, les unes par rapport aux autres. Toutes les grandeurs d'espèces différentes sont... différentes, c'est-à-dire irréductibles les unes par rapport aux autres, et ne peuvent être mesurées qu'avec une unité de leur propre espèce ⁽²⁾, ce qui n'empêche pas ces unités spécifiques d'avoir des dimensions dérivées des dimensions physiques arbitraires des trois unités fondamentales. On a choisi trois unités, LFT ou LMT, parce que ce nombre trois, empirique, est celui qui, après étude approfondie, soulève le moins d'objections théoriques et pratiques; c'est le nombre des moindres inconvénients; je ne puis pas insister. En plus, les étalons de ces grandeurs, prises pour unités, sont faciles à établir, comme le

(1) J'appliquais depuis de longues années la remarque suivante : une formule de salaire dont on ne connaît pas la nature et la dimension des unités, est une formule illusoire, en la sachant générale. J'ai publié la première indication à ce sujet, à l'occasion d'une communication à l'Académie des Sciences, insérée *in extenso* dans la *Technique Moderne*, n° 8, août 1922. J'ai étudié la fonction exponentielle à l'occasion d'un travail sur la *normalisation* des segments de longueur : *La loi des longueurs industrielles*, *Technique Moderne*, n° 5, 1^{er} mars 1923 ; puis j'ai examiné la fonction $\sin x$, dans le livre *Les Hauts Salaires* (Alcan, éditeur) ; j'ai également donné quelques applications de ma théorie des unités, avec des exemples analytiques et mécaniques, dans le même ouvrage.

(2) Je renvoie pour cette question des unités spécifiques au *Bulletin de la Société française des Electriciens*, n° 87, de novembre 1928, page 1147, à l'article : *Les calculs physiques et leurs unités*.

Mètre et le Kilogramme, ou à connaître, comme le Jour sidéral, dans le cas du temps.

Le langage.

Les noms désignent les choses, et les mots supportent les idées; pour s'expliquer il faut des mots, des noms; à défaut les peuples, car c'est d'eux qu'il s'agit ici, cessent de comprendre les philosophes, les physiciens et même les métrologistes.

J'emploie le langage de l'ancien système métrique; j'emploie les mots et les noms qui lui appartiennent avec les sens que leur ont donné les créateurs du système; les mots kilogramme, Quintal, Tonne, etc., désignent des forces. J'emploie aussi des mots appartenant à d'autres systèmes, comme Dyne et Sthène avec le sens qu'ils pourraient avoir dans le système métrique; enfin je désigne les unités qui ne sont pas dénommées par des mots ou noms nouveaux; je n'en propose pas l'usage, mais je m'en sers pour exposer mon sujet. Toutefois j'observe que, si on ne les juge pas convenables pour le but que j'envisage, la création d'un système de mesures universel, il ne suffira pas de les supprimer; il faudra encore les remplacer, car ils sont nécessaires. Je donne la nomenclature des termes dont j'use, dans un tableau spécial.

Les divers systèmes métriques.

Il faut s'entendre; j'appelle systèmes métriques, les divers systèmes possibles qui ont le Mètre pour unité de longueur.

Le système C. G. S. est centimétrique et décimal.

Le système anglais n'est ni métrique, ni décimal.

La longueur, la masse et le temps.

Les trois unités fondamentales de l'ancien système métrique étaient les unités de temps, de longueur et de force, la Seconde, le Mètre et le Kilogramme ou Grave. Dans le système C. G. S. et M. T. S., on a remplacé les unités de force, le Gramme et la Tonne, par les unités de masse, le Galilée (gramme-Masse) et le Tonneau, (tonne-Masse) ⁽¹⁾.

(1) Les systèmes C.G.S. et M.T.S. ont comporté la création, dans la gamme des dimensions physiques des forces, de deux unités nouvelles, pour lesquelles il fallut nécessairement créer des noms nouveaux. La Dyne et le Sthène ont des

Alors que dans l'ancien système métrique, les dimensions des unités de masse, utilisées en mécanique, le Newton de 9,81 Fortins et le Bouguer de 9,81 Tonneaux, étaient dérivées des dimensions des unités de force, le Kilogramme ou Grave, et la Tonne, c'est au contraire les dimensions des unités de force, la Dyne et le Sthène qui dérivent les dimensions des unités de masse, le Galilée et le Tonneau. Cette règle de corrélation qui fait dériver ces diverses dimensions physiques les unes des autres, semble exclusivement motivée par l'utilité d'écrire la loi de Galilée sous la forme : $f = mg$, sans coefficient parasite. Avec les unités on a :

$$f[F] = 1 \left[\frac{F}{L.M.T^{-2}} \right] \times \frac{m l}{t^2} \left[\frac{ML}{T^2} \right].$$

Il est incontestable que cette simplification d'écriture est d'une grande utilité pour les calculateurs, spécialement pour les analystes, car elle permet d'écrire :

$$f = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

sans coefficient. Mais le système métrique que je propose laisse entièrement subsister cette facilité (1).

La substitution de la masse à la force constitue une erreur pratique;

dimensions physiques proches de celles du Milligramme et du Quintal métrique. Par contre ces deux systèmes ne comportent pas l'usage du gramme-Force et de la tonne-Force ; par conséquent les mots Gramme et Tonne, sans emploi dans l'échelle des forces devenaient disponibles et pouvaient être transportés dans l'échelle des masses ; c'est ce que l'on fit ; par définition, dans ces deux systèmes, le Gramme et la Tonne sont des masses.

Au contraire, dans le système métrique le Gramme et la Tonne sont, par définition, des forces connues et en usage depuis plus d'un siècle ; ce qui manquait au système métrique, parce qu'on n'en avait pas éprouvé un besoin sérieux, c'était des noms pour désigner les unités de masse. En attendant mieux, les mots Galilée, Fortin, Tonneau, peuvent servir pour désigner clairement, à l'intérieur du système métrique absolu, les masses du centimètre cube, du décimètre cube et du mètre cube d'eau pure, à 4 degrés centigrades.

(1) Il suffit de persévérer dans l'habitude actuelle des mécaniciens et, sans rien changer aux errements, de continuer à employer l'unité auxiliaire de masse, le Newton, avec cette égalité physique :

$$1 \text{ [Newton]} = 9,80 \text{ [Fortins]}.$$

Cette définition élimine des calculs l'inutile coefficient parasite de la loi de Galilée.

L'emploi dans ce but étroitement limité, pratique, professionnel, d'une unité sans réalité, sans étalon, simple *unité de compte*, ne met aucunement en question le principe du système métrique absolu. Il suffit de montrer une fois aux écoliers, l'avantage pour eux, de cette unité de compte, pour qu'ils n'omettent plus jamais de profiter de sa commodité.

A la rigueur, il n'y a rien à faire, ni dire ; on emploie couramment le nombre 9,80 comme nombre approché ; il suffit de continuer.

ce n'est pas que je conteste la logique des deux systèmes C. G. S. et M. T. S.; elle est irréprochable. Mais si on estime, comme moi, qu'il est fâcheux de diviser l'humanité en deux parties, l'une faisant usage d'un système de mesures populaire, et l'autre d'un système savant mais hermétique à la foule, ce fut effectivement une erreur.

REMARQUE. — L'équation d'usage le plus étendu est la relation populaire de proportionnalité des forces aux masses

$$f[F] \doteq k \left[\frac{F}{M} \right] \cdot m[M].$$

Si l'une des deux grandeurs fondamentales est la force, l'unité *rationnelle* de masse ($k = 1$), dérivée de la dimension de l'unité de force, la Tonne, est le Tonneau; si la deuxième grandeur fondamentale est la masse, l'unité *rationnelle* de force, dérivée de la dimension de l'unité de masse, le Tonneau, est la Tonne.

Observations analogues pour les quatre systèmes métriques.

L'équation la plus usitée en mécanique est la relation de Galilée:

$$f[F] = k \left[\frac{F}{\text{LMT}^{-2}} \right] \frac{ml}{t^2} \left[\frac{\text{ML}}{\text{T}^2} \right].$$

Si la troisième grandeur fondamentale est la force, l'unité *rationnelle* de masse ($k = 1$), dérivée des dimensions des trois unités: Mètre, Seconde, Tonne, est le Bouguer de 9,80 Tonneaux.

Si la troisième grandeur fondamentale est la masse, l'unité *rationnelle* de force, dérivée des dimensions des trois unités: Mètre, Seconde, Tonneau, est le Sthène de 0,102 Tonne, environ.

Observations analogues pour les quatre systèmes métriques.

Il serait aisé d'en ajouter un cinquième avec le microgramme pour unité de force s'il y avait lieu.

Le système métrique III *bis* n'est pas usité; c'est un système de transition.

Le système V, non métrique, dit système C.G.S., est appelé vraisemblablement à disparaître. Le système d'usage universel populaire sera sans doute le système III, c'est-à-dire le système métrique de l'an II de la République Française, avec la nouvelle définition du kilogramme.

Le mot composé kilo-Gramme ne pouvant pas, grammaticalement, désigner une unité, dans aucune langue, il serait avantageux d'adopter le mot Grave; les trois unités du système universel populaire seraient le Mètre et le Grave, avec leurs multiples et sous-multiples décimaux, et la Seconde sexagésimale de temps moyen; l'heure décimale resterait à conquérir.

NOTA. — Les dénominations des unités de ce tableau seront jugées bonnes ou mauvaises; pour certains la question des mots sera capitale et la théorie des unités de nulle importance; pour d'autres, ce sera le contraire.

Nous pensons que si ces noms ne sont pas bons, il faut cependant les conserver en attendant qu'on les remplace par de meilleurs; les dénominations des unités d'un système de mesure *populaire* sont nécessaires.

La nouvelle définition du kilogramme absolu.

Les raisons de prudence silencieuse qui, peut-être, guidèrent les savants de l'ère républicaine, ont disparu depuis la création du système C. G. S. J'appelle Cavendish, la force capable d'imprimer au bloc Fortin, ou à ses copies, l'unité d'accélération soit: 1 Mètre: seconde par seconde; le Cavendish vaut 100 000 Dynes et 1/1000^e de Sthène.

Tableau des quatre systèmes métriques absolus.

Les unités de quatre systèmes métriques absolus

Systèmes métriques ; Unité d'accélération = mètre : seconde par seconde								
Numéros des systèmes	UNITÉS FONDAMENTALES						UNITÉS DÉRIVÉES	
	TEMPS		LONGUEUR		MASSE OU FORCE		FORCE OU MASSE	
	Sym- bole	Noms	Sym- bole	Noms	Sym- bole	Noms	Sym- bole	Noms
I	T	Seconde	L	Mètre	M	TONNEAU kilofortin	F	STHÈNE 0,102 Tonne
					F	TONNE mégagramme kilograve	M	BOUGUÉR 9,80 Tonneaux
II	T	Seconde	L	Mètre	M	FORTIN 10^{-3} Tonne	F	CAVENDISH 0,102 kilogramme
					F	GRAVE kilogramme	M	NEWTON 9,81 Fortin
III	T	Seconde	L	Mètre	M	GALILÉE millifortin 10^{-6} Tonne	F	MÉCHAIN 0,102 Gramme
					F	GRAMME milligrave	M	DELABRE 9,80 Galilée
IV	T	Seconde	L	Mètre	M	KÉPLER microfortin 10^{-9} Tonne	F	COPERNIC 0,102 milligramme
					F	CLAIRAUT milligramme micrograve	M	CASSINI 9,80 képler
Système métrique ; Unité d'accélération = mètre : seconde par seconde								
III bis	T	Seconde	L	Mètre	M	FABRONI centimillifortin centigalilée	F	DYNE 0,102 milligramme
					F	PICARD Centigramme centimilligrave	M	GINEAU 9,80 Fabroni
Système non métrique ; Unité d'accélération = centimètre : seconde par seconde								
V	T	Seconde	L	Centi- mètre	M	GALILÉE millifortin	F	DYNE 0,102 milligramme
					F	GRAMME milligrave	M	DELABRE 9,80 Galilée

La nouvelle définition du Kilogramme est la suivante : l'unité de force du système métrique absolu, est le Kilogramme théorique universel; il vaut 9,80 Cavendish. Autrement dit le Kilogramme théorique — car il y a un Kilogramme pratique — est la force capable d'imprimer à l'unité de masse du système métrique absolu, une accélération de 9,80 Mètres : seconde par seconde ; il vaut 980 000 Dynes. Il est bien entendu que ce nombre 9,80 n'est pas un nombre expérimental, sujet à révision suivant la précision des expériences, comme l'était le nombre $g = 9,8099\dots$, valeur de l'accélération de la pesanteur à Paris. C'est un multiplicateur, un nombre abstrait, un nombre de définition, et c'est pour cela que le système métrique auquel appartient cette unité est absolu, au sens de Gauss, comme les systèmes C. G. S. et M. T. S.

Le kilogramme pratique, unité relative de force.

Le Kilogramme pratique est le poids du bloc Fortin, en tous lieux; c'est une unité *relative* à la localité; sa dimension physique diffère pratiquement peu de celle du kilogramme théorique. En mesurant les forces, ou poids, en Kilogrammes universels, et les masses en Fortins, on a pour le poids d'un corps, à l'équateur :

$$f[\text{F}] = 0,998 \left[\frac{\text{F}}{\text{M}} \right] \cdot m[\text{M}]$$

soit : $f = 0,998 m$ [Kilogrammes théoriques absolus]

et aux approches du pôle, on a :

$$f = 1,002 m \text{ [Kilogrammes théoriques absolus]}.$$

En Kilogrammes pratiques, on a partout :

$$p[\text{K}] = 1 \left[\frac{\text{K}}{\text{M}} \right] \times m[\text{M}].$$

$$p = m.$$

La mesure du poids du corps, en kilogrammes pratiques, est égal à la mesure de la masse, en Fortins. L'approximation est suffisante pour la pratique industrielle, mais non pour la science.

Quant au commerce, il ne mesure que des masses; or le bloc Fortin et ses copies sont des unités absolues de masse.

L'étalon de l'unité absolue de masse.

Comme nous l'avons vu, le bloc Fortin n'a pas été créé pour être un

étalon de masse, mais pour faire connaître l'étalon de force, par l'intermédiaire de la loi de Newton $k = k \frac{mm'}{r^2}$ ramenée à la forme simple :

$f = m$, par la contraction $k' = \frac{km}{r^2} = 1$, des termes constants. Le bloc

Fortin, encore aujourd'hui, n'est pas l'unité de masse habituelle des mécaniciens; ils mesurent la masse d'un corps, en Newtons, à l'aide du rapport P/g . Donc pour eux, le bloc Fortin est une masse de référence, par conséquent un étalon auxiliaire, mais non l'étalon de l'unité de masse. Au contraire dans la relation locale de proportionnalité

$$f[F] = 1 \left[\frac{F}{M} \right] m[M]$$

$$f \text{ [Kilogrammes pratiques]} = m \text{ [Fortins]}$$

le bloc Fortin est une unité et aussi l'étalon de l'unité de masse.

Innombrables sont les auteurs qui écrivent encore que la masse est un coefficient; certains complètent en ajoutant : un coefficient d'inertie. Ce langage, admissible autrefois, est aujourd'hui intolérable. Ce bloc de matière, le bloc Fortin, c'est visible, n'est pas un coefficient. *A priori*, déclarer qu'un bloc de matière est un nombre est une aberration. D'ailleurs personne n'a étayé cette étrange affirmation d'aucun commencement de preuve; il faut donc absolument la rejeter de la mécanique classique, au moins jusqu'à nouvel ordre.

L'étalon de l'unité relative de force.

La majorité des hommes n'a pas à connaître, ne pourra jamais connaître la masse et son unité, si celle-ci n'est pas le bloc Fortin lui-même, ou une de ses copies. Au contraire la majorité des hommes a besoin de connaître, peut connaître et même connaît la force.

La connaissance physique complète de la nature de la force est donnée à l'homme par l'effort musculaire; l'homme connaît la force aussi bien qu'il connaît l'espace et le temps; pas mieux, sans doute, mais aussi bien. Les ratiocinations des métaphysiciens peuvent s'exercer avec la même efficacité à l'occasion de la nature de la longueur, de la surface, de l'angle, de la courbure, etc. La majorité des hommes n'a que faire de ces raisonnements abstrus; si l'on veut quand même les appliquer au sujet de l'établissement d'un système de mesures destiné à l'usage universel, c'est-à-dire à l'occasion des premiers rudiments de la physique, certains déclareront, avec une apparence de

raison, que ce sont là de simples divagations; quant à nous, par déférence, nous dirons que ce sont de savantes considérations, mais, ici, hors de propos.

L'homme connaît la force et a besoin d'un étalon unité pour mesurer les forces industrielles, ou simplement pour mesurer la force de son propre biceps. Cette unité doit, pour ce motif, être à l'échelle humaine; de toutes, la plus convenable, c'est le Kilogramme pratique ⁽¹⁾.

(1) *Etalon de l'unité de force ; Kilogramme pratique et Kilogramme absolu.* — Possédant une copie du bloc Fortin, les industriels et les techniciens possèdent aussi directement l'étalon du Kilogramme pratique, c'est-à-dire l'étalon de l'unité de force usuelle, puisque c'est le poids local de l'unité de masse (frein de Prony).

On peut aussi avoir besoin, pour certaines expériences, de connaître l'étalon de l'unité absolue de force, le Kilogramme universel. (Détermination de l'équivalent mécanique de l'unité de quantité de chaleur.)

Nous avons signalé dans la revue *l'Industrie électrique* du 10 mai 1929, page 208, qu'on a entre les poids et les masses, la relation inédite :

$$p[F] = k \left[\frac{F}{M} \right] \times n[M] \times \frac{g'}{g} [L^0 G^0].$$

Cette égalité montre que le coefficient de proportionnalité k , ou même le produit $\frac{k g'}{g}$ est numériquement indépendant de la dimension de l'unité d'accélération ; celle-ci peut être le Mètre : seconde par seconde, ou le Yard : seconde par seconde, le résultat numérique reste invariable ; le coefficient k ne dépend que des dimensions physiques des deux unités de force $[F]$ et de masse $[M]$.

Soient $g = 9.8099...$ l'accélération de la pesanteur à Paris et $g = 9.8311...$ l'accélération en un autre lieu géographique, au pôle, par exemple ; on a pour poids en ce lieu, en Kilogrammes de Paris, d'une masse m , mesurée en unités de dimension quelconque :

$$p[F] = k \left[\frac{F}{M} \right] \times m[M] \times \frac{9.8311...}{9.8099...}, \text{ avec } k \geq 1.$$

Le poids de l'unité de masse, au même lieu, lorsque sa dimension, en masse, est celle du bloc Fortin, est :

$$p'[F] = 1 \left[\frac{F}{M} \right] \times 1[M] \times \frac{9.8311...}{9.8099...}, \text{ avec } k = 1$$

Soit

$$p' = \frac{9.8311...}{9.8099...} [\text{Kilogrammes de Paris}]$$

Le poids de cette même unité de masse, en Kilogrammes absolus, sera :

$$p'' = \frac{9.8311...}{9.8000} [\text{Kilogrammes universels}].$$

Dans le deuxième cas, le dénominateur 9.80 n'est plus un nombre expérimental, sujet à révision, comme dans le premier cas, mais un nombre de définition fixé à jamais. Si donc on possède une des copies du bloc Fortin, copies qui, on le sait, peuvent être établies avec une haute précision, et si on connaît la mesure g' de l'accélération de la pesanteur en un lieu géographique déterminé, on connaît aussi le poids p'' de ce bloc, soit en Kilogrammes de Paris, soit en Kilogrammes universels, avec une précision qui dépend presque uniquement de la précision de la mesure de g' , dans le second cas. Cette force, ce poids, est plus grand ou plus petit, suivant le lieu, que le Kilogramme théorique ; le poids de ce bloc de matière n'est donc pas l'étalon de l'unité de force à proprement parler, mais simplement une force étalonnée.

Pour avoir l'étalon de l'unité de force absolue en ce lieu, il faut construire un autre bloc, une autre masse matérielle, de nature quelconque, dont la dimen-

La Dyne et le Milligramme sont à l'échelle des insectes; l'homme ne les connaît pas et ne peut pas les connaître sensoriellement; mais combien il est facile, par suite des précieuses qualités des nombres décimaux, de connaître intellectuellement le Milligramme, millième de Gramme, millionième de Kilogramme. Avec la définition théorique du Kilogramme, le Gramme vaut juste 980 Dynes, et la Dyne vaut environ 1,0204 Milligramme. M'adressant, non aux hommes auxquels la Dyne est familière, mais aux hommes des professions libérales, à l'homme de la rue, je pose cette question : n'est-il pas un peu ridicule, vu le résultat à obtenir, de poursuivre le remplacement, dans l'esprit de tous, du Milligramme, de conception si simple, par la Dyne, qui vaut 2 centièmes de plus ; cette variation de 2 centièmes n'est-elle pas payée plus cher qu'elle ne vaut?

L'homme ne peut pas davantage connaître la Tonne, unité à l'usage d'une humanité qui serait taillée sur le modèle de la faune préhistorique. L'homme ne peut connaître la Tonne qu'à la façon dont il peut connaître, également, la force d'attraction de la Terre et de la Lune, par le moyen d'une multiplication, d'un calcul; il ne peut connaître la Dyne que par une division, un autre calcul.

Mais il connaît le Kilogramme par une perception directe de l'effort nécessaire pour soulever un bloc Fortin; le Kilogramme choisi par nos pères, est à l'échelle humaine; cette unité convient aux peuples, c'est donc bien celle qu'il faut conserver et propager, à l'exclusion de la Dyne et du Stène, qui sont disproportionnés à nos besoins et qui, d'ailleurs, n'ont pas d'étalons.

sion physique, *en masse*, sera égale à celle du bloc Fortin, multipliée par g/g' ; en effet, on a alors :

$$1[F] = 1\left[\frac{F}{M}\right] \times \frac{g}{g'}[M] \times \frac{g'}{g}[1.0T0] = 1[F].$$

Cette seconde masse $g/g'[M]$ a pour poids local le kilogramme de Paris, ou le Kilogramme universel, selon le cas ; ceci aux approximations près sur le calcul de la valeur locale de g' , et sur celui de la valeur de g à Paris, et aussi aux approximations de construction de la copie du bloc Fortin dont on dispose, et du bloc secondaire construit spécialement pour faire connaître la grandeur physique de la force unité, au lieu considéré.

On ne manquera pas de remarquer que l'unité de masse et la masse de poids unité sont ici clairement dissociées, puisque l'unité de masse est représentée par un bloc d'une certaine matière, tandis que la masse de poids unité est représentée par un bloc d'une autre matière.

Tout cela n'est pas nouveau quant aux résultats, mais ne ressemble guère aux dissertations classiques sur la *masse-coefficient*, ou sur la nature cachée de la force, nature qui n'est cependant pas plus mystérieuse que celle de la longueur dont on ne dit jamais rien, au moins dans les livres d'enseignement usuels, ce qui sous-entend que la nature physique de la longueur est clairement connue. Dans le cas du Kilogramme universel, le nombre $g = 9,80$, nombre de définition, ne comporte pas d'erreur expérimentale.

Les quatre systèmes métriques absolus du tableau joint à cette note, qui peuvent être désignés par les noms de leurs unités de force : la *Tonne* (mégagramme), le *Grave* (kilogramme), le *Gramme* et le *Képler* (milligramme), permettent à chacun de choisir les unités conformément à ses besoins; le milligramme et le Gramme, pour mesurer des forces faibles; le kilogramme pour les forces moyennes; la Tonne et au delà, comme en deça du Képler, pour les forces plus grandes ou plus petites ⁽¹⁾.

A chacune de ces unités on peut adjoindre les préfixes du système décimal : hecto, kilo, déci, centi, etc., et l'on passe d'un système à l'autre avec la plus grande facilité, par le changement de 1 000 et 1 000, des diverses dimensions d'une seule unité, l'unité de force, alors que le système C. G. S., outre qu'il n'est pas métrique, comporte le changement des dimensions de deux unités de longueur et de masse.

Conclusions.

La généralité des hommes a besoin d'un système de mesures et *d'un seul*; ce système doit être enseigné à tous dès le plus bas âge; un second système, basé sur des principes différents, comme dans le cas de la substitution de la masse à la force, n'est pas seulement inutile, mais de plus il est nuisible, au point de vue auquel je me place.

Comme conséquence de cette universalité nécessaire, les natures physiques des trois grandeurs fondamentales du système à préconiser, doivent être clairement conçues et connues des hommes les moins instruits, et même des illettrés; c'est le cas pour la longueur, la force et le temps, ce n'est pas le cas de la masse.

En même temps ce système, par des subdivisions extrêmement simples, doit pouvoir être facilement accessible à l'enseignement primaire, à l'enseignement secondaire, et il doit pouvoir, en outre, satisfaire aux plus difficiles exigences des hommes de science.

Ce système existe; c'est le système métrique, à trois grandeurs fondamentales : longueur, force, temps, de la Révolution française ⁽²⁾, complété par une définition nouvelle, plus précise et plus générale que celle de l'ancien Kilogramme de frimaire, an VIII, qui avait le grave

(1) Pratiquement les dimensions physiques des quatre forces unités des quatre systèmes métriques sont les poids du Mètre cube, du Décimètre cube, du Centimètre cube et du Millimètre cube d'eau pure à 4 degrés centigrades.

(2) Même observation que plus haut ; voir les objections de M. Ed. Guillaume,

inconvenient d'être affecté d'un coefficient géographique particulier; l'ancienne unité de force était une unité *relative*; le Kilogramme universel est une unité *absolue*.

Puisque je suis devant la *Société française des Electriciens*, je crois devoir dire qu'il est de l'intérêt commercial des constructeurs électriciens d'abandonner le système C. G. S., en faveur du système métrique nouveau, parce que leurs mesures seront mieux comprises du public, ou tout au moins seront comprises d'un public plus étendu.

Les mécaniciens doivent persévérer dans leur attachement au système métrique, comme actuellement. Quant aux physiciens, ils doivent rejeter formellement le système C. G. S. dans l'intérêt même des disciplines qui leur sont chères, car le chemin triomphal de la science ne peut être qu'une voie largement ouverte à tous les esprits, et non pas un sentier fermé par un guichet que quelques initiés, clairsemés dans la foule des hommes, savent ouvrir.

Puisqu'il n'est de science que du mesurable, tout accès à la science passe par la porte du calcul, porte dont la serrure est le système d'unités. Il est donc utile, dans l'intérêt même des études scientifiques, que cette serrure soit de manœuvre simple; il vaut mieux que la porte soit le monumental système métrique français, dont le seuil est hospitalier à tous les écoliers, que le guichet du système C. G. S., dont le loquet, défendu par la loi de Galilée, est, en plus, caché par l'obscurité des idées propagées par de nombreux et savants professeurs, qui enseignent encore qu'une quantité de matière, ou masse d'un corps, est un coefficient.

La loi de Galilée restera inconnue de la majorité des hommes, car ils n'ont aucun besoin de la connaître. Tous, au contraire, ont à connaître et à appliquer la loi fondamentale de la statique des forces : $f = m$.

Et enfin quand les savants, qui discutent entre eux depuis Newton sans s'entendre, ni tous se bien comprendre, au sujet de la *masse-matière*, seront enfin tombés d'accord, on peut, sans témérité, admettre que cette grandeur, la masse, que le plus grand nombre appelle un *coefficient constant*, que d'autres, plus instruits, appellent un *coefficient variable*, restera quand même incomprise du populaire. La présence de la masse, parmi les trois unités fondamentales d'un système de mesures universel, admissible dans le cas d'un système à l'usage exclusif des savants, doit être formellement rejetée d'un système destiné à être enseigné aux enfants de tous les peuples.

Il serait d'ailleurs ridicule de tenter, à l'occasion du système mé-

trique, qu'ils doivent apprendre, d'astreindre les candidats au certificat d'études primaires, à se faire une juste idée de la masse, car alors il faudrait bien instruire ces bambins des péripéties de la lutte entre les anciens et les modernes, pour la définitive conquête d'une notion obscure depuis si longtemps. Ce serait donc leurs maîtres d'école, qui devraient choisir pour eux, entre la masse, coefficient fixe, suivant Newton, et la masse, coefficient variable, suivant les disciples d'Einstein.

Il faut abandonner le système C. G. S., car aujourd'hui, plus que jamais, c'est à l'école primaire qu'il faudra faire gravir à l'humanité les premiers échelons de la science; il ne faut pas rompre les faibles liens qui réunissent l'enseignement élémentaire à l'enseignement scientifique supérieur. Un mauvais système de mesures pourrait suffire à couper les ponts, ou simplement à rendre le chemin plus difficile; il faut proscrire le système C. G. S., non de l'usage, mais de l'enseignement, ce qui est aisé.

Etant donné que je recommande l'abandon du système C. G. S. en faveur d'un retour au système métrique français, dans l'intérêt des arts industriels comme aussi dans l'intérêt de la science, dont un système de mesures simple et accessible à tous ne peut que faciliter la diffusion, devant les membres de la *Section des mesures* de la *Société française des Electriciens*, pour lesquels ces questions d'unités sont dépouillées de tout mystère, j'ai cru utile d'appuyer presque uniquement, dans ce peu de pages, sur les considérations fondamentales d'ordre psychologique et pratique. Il ne m'a pas semblé que ce que je dis de la supériorité du système métrique, comme *système universel* de mesures, puisse soulever d'observations; c'est pourquoi j'ai négligé beaucoup de détails intéressants; si toutefois je me suis trompé, je répondrai de mon mieux aux objections théoriques, s'il s'en présente, et si je le puis.

Quant à l'objection pratique relative au désagrément pour les électriciens de changer encore une fois de système de mesures, je réponds d'avance que je la considère comme de peu de poids, respectable, certes, mais surtout sentimentale.

D'abord ce petit désagrément des calculateurs ne sera que la rançon de l'erreur pratique qu'ils ont commise autrefois, en substituant l'unité de masse à l'unité de force. D'autre part ils sont les seuls, vraisemblablement, vu leur petit nombre, par rapport à la centaine de millions d'usagers du système métrique, vu surtout leur parfaite connaissance du sujet, à pouvoir rejeter un système particulier, peu satisfaisant, pour se rallier à un système plus simple et plus général.

Qu'au surplus, il me semble impossible qu'ils puissent jamais imposer l'usage de leur système actuel à la généralité des hommes (1); et qu'enfin, s'il plaît aux électriciens de conserver leur système en L. M. T., et de se séparer, sur le sujet que nous étudions, du reste des humains, c'est en leur pouvoir et c'est leur affaire.

J'ai écrit cette note pour essayer de leur montrer qu'ils n'auraient pas raison, pour un médiocre motif, de continuer à s'isoler de leurs lecteurs, de leurs clients, de l'humanité; et enfin si mon plaidoyer pour la restauration du système métrique universel n'est pas accueilli par eux, je me consolerai en pensant que l'impression de cette note n'aura pas coûté, pour un même résultat, autant de travail et de dépenses que les triangulations du Pérou et de la Laponie, ou même la construction du bloc Fortin.

Toutefois, ce qui paraît à peu près certain, c'est que le système C. G. S. qui, dans l'intention de le supplanter, avait dégradé l'ancien système métrique, en le montrant comme tout au plus convenable pour les grossiers calculs industriels et commerciaux, devra renoncer à cette prétention à l'égard du nouveau *système métrique*; celui-ci est apte aux travaux scientifiques, au même titre que le système *centimétrique*; c'est un *système absolu*.

Note de M. Guillaume

Il se trouve dans l'exposé de M. BAYLE quelques erreurs que je voudrais d'abord corriger.

1° Ce n'est pas lord KELVIN qui a proposé le Système C. G. S., mais bien l'Association britannique, qui l'a élaboré en 1861 et 1863. Peut-être lord KELVIN l'a-t-il proposé au Congrès international d'Electricité : mais c'est son élaboration qui est importante.

Le Système C. G. S. est universellement adopté, et les partisans du Système métrique ne peuvent que s'en féliciter, parce que c'est à peu près le seul moyen que l'on possède de faire accepter ce Système par les Anglo-Saxons. Mais il ne faut pas se dissimuler que le Système

(1) Grosso-modo, on peut dire qu'il existe deux systèmes de mesures, celui des électriciens, en LMT, et celui des mécaniciens, en LFT, système qui est aussi celui de tout le monde. Pour un écolier qui apprend le système des électriciens, il en est cent ou mille qui, dans l'enseignement primaire et secondaire, apprennent le système métrique, et ne connaîtront jamais que celui-ci ; le résultat final ne paraît pas douteux.

C. G. S. n'est pas le meilleur système que l'on puisse déduire des unités métriques.

En général, les unités de longueur doivent progresser par puissance de trois : millimètre, mètre, kilomètre, etc... par conséquent millimètre, milligramme, seconde, comme mètre, tonne seconde. Il n'y a pas à revenir là dessus, puisque le Système C. G. S. est d'un usage universel, et, qu'après tout, la question de principe est beaucoup moins importante que la pratique universelle du système.

Quant au Système M. T. S., il a été proposé au cours de la cinquième conférence générale des Poids et Mesures, réunie à Sèvres en octobre 1913.

M. VIOLLE ayant exposé le projet de définition des unités fondamentales à fixer par voie législative, et décrit un système dans lequel la longueur était le mètre, la masse, le Kilogramme, le temps, la seconde, et qui conduisait directement au joule et au watt, les comptes rendus, après un résumé de son discours, contiennent la phrase suivante :

« M. APPEL, en sa qualité de mathématicien, fait remarquer qu'au point de vue purement scientifique, l'unité de longueur étant le Mètre, l'unité de masse devrait être le Mètre cube d'eau. Il suppose que les fondateurs du Système métrique ont été amenés par des considérations pratiques à choisir le Décimètre cube ».

Après la Conférence, la Commission française reprit l'étude du système d'unités et aboutit à un projet de loi qui fut présenté aux chambres en 1914, mais ne vint en discussion qu'en 1919, PEROT étant président de la Commission française, M. Charles LALLEMAND a soutenu ce projet en particulier devant le Bureau des Longitudes, mais il n'en est pas à proprement parler l'auteur.

Ces deux points secondaires étant bien établis, je voudrais montrer que le kilogramme est, dès son origine, l'unité de masse du système métrique, et non l'unité de force comme le pense M. BAYLE.

Pour cela, il n'y a qu'à lire avec soin ce qui se rapporte à cette définition dans la Base du Système métrique décimal de DELAMBRE. Van SWINDEN écrivait, par exemple, dans le Rapport à l'Institut national des Sciences et Arts, le 29 prairial an VII :

« Nos deux kilogrammes de platine et de laiton, ces deux représentatifs d'une même masse d'eau, doivent avoir le même poids dans le vide »...

Dans le cours du XIX^e siècle, le langage manqua parfois de précision, et le poids fut confondu avec la masse. Mais dans sa session de 1887, le

Comité international des Poids et Mesures décida de prendre la masse du kilogramme international comme unité pour le service international des Poids et Mesures. Voir « La situation actuelle du Système métrique » (*Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, deuxième série, tome ix, n° 81).

Voir aussi « Nature de la grandeur représentée par le kilogramme » in « Décisions prises par la Conférence générale des Poids et Mesures et par le Comité international, concernant les unités et les prototypes métriques ». Il ne saurait donc y avoir de doute sur la nature de l'unité que représente le kilogramme. Voir aussi le poids normal (*Loc. cit.*, page 10). Le poids normal du kilogramme est égal à la masse du kilogramme multipliée par l'accélération normale de la pesanteur, soit $9,806\ 65 \frac{\text{mètre}}{\text{seconde}^2}$.

Je ne puis donc pas être d'accord avec les affirmations contenues dans le mémoire de M. BAYLE, où il dit :

« Le bloc Fortin n'a pas été créé pour être un étalon de masse, mais pour faire connaître l'étalon de force par l'intermédiaire de la loi de « Newton ».

De même lorsqu'il dit :

« Ce système existe, c'est le système métrique à trois grandeurs fondamentales : longueur, force, temps... »

Prenons la chose par un autre côté : un kilogramme doit être comparé à un autre kilogramme avec une précision meilleure que le centième de milligramme soit au cent-millionième sûr. Mais le poids ne peut être connu que lorsqu'on détermine la pesanteur au lieu même où il doit être employé. Or la détermination de g est faite au maximum avec une précision de 1 millionième, et sa répartition à la surface de la terre présente des anomalies telles que, si l'on veut représenter g par une formule générale, on voit la précision s'abaisser d'une ou même de deux unités.

Assurément, la comparaison des masses ne peut être faite avec facilité et précision qu'en comparant des poids, c'est-à-dire des efforts produits par les masses sur leur support. Mais le g s'élimine parce que ces comparaisons ont lieu en un même point de l'espace.

Réponse de M. F. Bayle à la Note de M. Ch.-Ed. Guillaume

M. Ch. Ed. GUILLAUME connaît mieux que moi l'histoire des systèmes de mesures C. G. S. et M. T. S.; les quelques erreurs que j'ai

commises, concernant la paternité de ces systèmes, seront donc corrigées conformément à sa rectification, qui en avertira le lecteur.

Au sujet de l'opinion de Van SVINDEN, insérée dans le rapport de celui-ci à l'*Institut national des Sciences et Arts*, en prairial, an VII : « Nos deux kilogrammes de platine et de laiton, ces deux représentatifs d'une même masse d'eau dans le vide.... etc., je présente l'observation suivante.

Pour désigner une quantité de matière, au sens ancien et même antique, une certaine quantité d'eau, un bloc de pierre, etc., on ne disposait pas d'autre vocable que le mot *masse*. Aujourd'hui encore, dans les métiers, un lourd marteau s'appelle une *masse*; on dit couramment aussi : la *masse* de l'obélisque de Louqsor; ou encore, à l'occasion de la rupture d'un barrage : la *masse* d'eau s'écroula d'un bloc dans la vallée; or, de ces expressions, l'idée de la *masse*, au sens métrologique actuel, est *complètement* absente.

Elle y est cependant incluse *totale*ment peut-on répondre, et c'est vrai, mais si obscurément que c'est comme si elle n'y était pas.

Si Van SVINDEN avait écrit : nos deux blocs de platine et de laiton, pour représenter une même quantité d'eau, de volume déterminé, doivent avoir le même poids que cette *masse* d'eau dans le vide, il peut paraître qu'il aurait énoncé d'une façon plus précise l'idée que voici : il est entendu que, malgré leurs différences de densité et par conséquent de volumes, les blocs solides de laiton et de platine, et le bloc liquide, doivent avoir, dans le vide, le même poids. En effet, sans qu'il soit question de la *masse* actuelle, c'était là une condition expressément exigée par la définition du kilogramme-poids, à Paris comme ailleurs.

Le langage de TRALLÈS, cité par M. GUILLAUME dans sa communication à la *Société internationale des électriciens*, séance du 5 janvier 1909, sur cette question, montre également qu'aucune confusion ne régnait dans les esprits (ce n'était pas possible) entre le poids d'un corps (force), et sa *masse* physique, ou quantité de matière; mais la claire notion contemporaine de la *masse* là aussi, selon-nous, faisait défaut, sans cependant qu'on puisse dire, ni même supposer, qu'elle était *complètement* absente, puisque le mode de définition choisi de l'étalon de force imposait nécessairement la présence d'un bloc de matière, c'est-à-dire d'une *masse* au sens populaire d'autrefois, mais non nécessairement au sens scientifique d'aujourd'hui, lequel est cependant inclus dans le précédent, comme un diamant dans la gangue qui rend le précieux joyau invisible.

De sorte que si au cours du XIX^e siècle le langage a manqué de précision, si le poids fut confondu avec la masse, comme le constate M. GUILLAUME, ce n'est pas parce qu'on avait oublié le sens précis du langage de prairial, an VII, mais bien au contraire parce qu'on continuait ce langage avec son sens populaire imprécis, car l'idée scientifique actuelle de la masse ne s'était pas encore communément et suffisamment dégagée de la scolastique qui faisait de la masse scientifique de l'époque, un coefficient de valeur numérique P/g . (1).

On disait couramment, au sens populaire : la masse du corps soumis à l'expérience de la chute des corps est caractérisée par le coefficient P/g ; ce qui voulait dire : l'objet physique soumis à l'expérience est caractérisé numériquement par le rapport P/g ; d'où, par une intervention naturelle : le coefficient P/g caractérise la masse du corps soumis à l'expérience.

Dans ces expressions le mot masse est bien à sa place, au sens populaire, mais non au sens précis actuel, car l'idée de masse, grandeur directement mesurable *sans faire appel aux lois de la dynamique*, n'y est pas.

Je reconnais que la thèse contraire est fortement soutenue; malgré tout, le doute reste permis, et je continue à douter pour la raison simplifiée suivante : si c'est le poids du bloc de métal que les savants de l'an VII appelaient Kilogramme, le bloc lui-même n'avait pas de nom; c'était logique puisque l'idée de masse manquait; la chose inconnue n'était pas dénommée; elle était représentée par un coefficient.

Si au contraire c'est le bloc de platine qui était désigné par le mot Kilogramme, c'est alors l'unité de force qui n'avait pas de nom; cela

(1) Cependant on sait que GAUSS employait déjà comme unité de masse le *Centimètre cube d'eau pure à 4° centigrades*; cette dénomination, cette périphrase lui paraissait peu pratique et même, vu sa fréquente répétition, fort incommode; sans autre forme de procès, pour sa facilité, il s'empara du mot Gramme, et l'appliqua à son unité de masse. Du même coup, la langue française se trouvait dépossédée d'un mot nécessaire qu'il fallut remplacer par le mot mal composé, *gramme-force*, qui fit nécessairement naître le mot *gramme-masse*. Ce complexe comprend le mot propre Gramme, transformé en nom commun, *gramme*, avec la signification d'*unité*, auquel on adjoint le nom propre de l'espèce de grandeur; alors pourquoi ne pas désigner la petite calorie par le mot *gramme-Chaleur*, etc. Le larcin linguistique de GAUSS, pour explicable qu'il soit, ne fut pas inoffensif; il troubla l'esprit d'innombrables écoliers et aussi celui de quelques magisters, en tous pays.

Or dans le domaine scientifique, il n'y a pas de prescription; l'ancienneté d'une définition de mot, serait-elle d'Aristote, ne confère pas à celle-ci la pérennité; à fortiori en est-il de même lorsque le sens du mot est déplacé, usurpé; je remets donc simplement les choses à leur place; j'appelle Gramme, ou milli-Grave, l'unité absolue de force, et milli-Fortin ou Galilée, l'unité correspondante du système métrique absolu n° 3, de cette note.

est peu vraisemblable, car la force était connue et l'idée de force claire.

Enfin la troisième hypothèse; le même nom pour désigner deux choses aussi étrangères l'une à l'autre que l'unité de force et l'unité de masse, n'est pas à retenir.

Et comme couronnement, les prodigieuses applications de la mécanique, au XIX^e siècle, se sont développées sous le signe du système de mesures à bases : longueur, force, temps, à tout le moins, on l'a cru, ce qui est la même chose, et le résultat général fut satisfaisant.

En résumé, je pense que M. GUILLAUME a raison de dire, sans qu'aucun doute ne soit possible, que le bloc Fortin est considéré de nos jours, surtout depuis la seconde moitié du XIX^e siècle (1887), comme un étalon de masse, au dernier sens scientifique de ce mot, mais il me paraît difficile d'admettre qu'il en était généralement ainsi en prairial, an VII, et plus encore d'admettre que ce bloc ait été reconnu à cette époque comme l'unité de masse selon les vues actuelles, car alors on eut été forcé d'écrire la loi de Galilée sous la forme : $f = kmg$, ce qu'on ne fit pas; on écrivait : $f = mg$.

Je remercie M. GUILLAUME d'avoir fait connaître son opinion concernant le passé; toutefois, l'important, c'est l'avenir et j'ajouterais même, si je l'osais, que le passé historique n'importe plus. Je propose le retour au système de mesures de la première République, mis en conformité avec les vues de Gauss; tel est l'objet précis de ma communication; mal instruit de l'histoire, j'ai sur ce point, au contraire, des idées nettes.

M. GUILLAUME est le représentant, en métrologie, de la loi française, et aussi le gardien-chef, si on me passe l'expression, des conventions internationales. Je n'ose espérer qu'il puisse se ranger officiellement, à mon avis; du moins, de mon côté, sachant que les choses officielles évoluent lentement, je n'y compte guère; je suis, en effet, en révolte ouverte contre ces conventions — énormes charrettes difficiles à ébranler — et aussi, on pourrait le croire, contre la dernière loi française sur la matière.

Simple voiture à bras! Que non pas.

Sur ce dernier point les apparences seules sont contre moi; le système métrique que je propose est légal en France; je le montrerai. Et cela vaut mieux.

Mais il est une observation qui me touche profondément : la question de principe est moins importante que la pratique... dit M. GUILLAUME. Rien de plus juste

Si je parvenais à me convaincre que le système C. G. S. peut être

adopté universellement, je n'insisterai pas; mais je crois que ce système est incompréhensible de la foule, et par conséquent inutilisable par la généralité des hommes; d'où il résulte, à mon avis, qu'il n'a aucune chance de devenir le système d'usage universel *unique*.

Enfin je pense encore que le monde anglo-saxon est engagé à jamais envers les étalons métriques : Gramme, centimètre; de sorte qu'aucun retour au Yard n'étant plus possible, que le système C. G. S. ne pouvant pas devenir populaire, surtout qu'il ne peut pas y avoir raisonnablement deux systèmes de mesures, un pour le peuple, l'autre pour les mandarins, je pense, dis-je, que le seul système d'usage universel sera le système métrique absolu : l'opinion humaine l'imposera peut-être un jour.

Par déférence pour M. GUILLAUME, je devais répondre de mon mieux; je l'ai fait aussi succinctement que j'ai pu.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

RAPPORTS PRÉSENTÉS A LA SEMAINE D'OCTOBRE 1929 (1) (suite) :

2^e Section. — Sur l'éclairage par les tubes luminescents (M. DARMOIS), p. 1046

3^e Section. — Le redresseur Rectox à oxyde de cuivre (M. Maurice LEBLANC), p. 1061.

4^e Section. — Le freinage électrique en courant continu des trains sur pentes (M. GRATZMULLER), p. 1069.

5^e Section. — Les alliages à haute perméabilité (M. CHAUCHAT), p. 1091. — La liaison radiotéléphonique Paris-Buenos-Ayres par ondes courtes projetées (M. VILLEM R.), p. 1167. — Transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes (M. FAYARD), p. 1146.

6^e Section. — Sur la définition des capacités (M. LIENARD), p. 1158. — Observations (M. LIENARD), p. 1165. — Vues modernes sur l'électrostatique (M. CHAUMAT), p. 1168. — Dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celles de Boucherot (M. P. BUNET), p. 1179. — Projet de clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance (M. de la GORCE), p. 1187.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

4^e série, tome IX, Octobre 1929, n° 98.

RAPPORT SUR L'ÉCLAIRAGE PAR LES TUBES LUMINESCENTS ⁽¹⁾

par M. E. DARMOIS.

Purification des gaz. — Fonctionnement électrique des tubes ; passage du courant dans un tube à cathode froide ; tubes à cathode chaude. — Caractéristiques électriques des tubes luminescents. — Emission de la lumière et photométrie. — Applications.

En pratique, les tubes luminescents contiennent, soit de la vapeur de mercure, soit des gaz rares : néon, argon, hélium.

PURIFICATION DES GAZ. — La purification du mercure est classique et facile, aussi on ne trouve rien dans la littérature au sujet du mercure impur.

Pour l'argon, peu d'indications sont données ; on purifie généralement l'argon extrait de l'air liquide par le magnésium.

La purification du néon a été décrite sommairement par Claude ⁽²⁾ ; elle s'effectue dans le tube même en faisant passer la décharge dans le néon impur, le tube étant connecté à un piège à air liquide contenant du charbon de noix de coco ; la purification modifie considérablement le rendement lumineux du tube. GÜNTHERSCHULZE a signalé que l'emploi d'une électrode en alliage potassium-sodium nettoie très rapidement le néon ⁽³⁾. Il est probable qu'il existe d'autres procédés non publiés ; la discussion nous apportera peut-être des précisions à ce sujet.

La purification de l'hélium a fait l'objet d'un article important de M. LEPAPE ⁽⁴⁾ ; l'article traite surtout de l'hélium destiné au gonflement des ballons ; M. LEPAPE pourra peut-être nous fournir des précisions complémentaires pour l'hélium des tubes luminescents.

I. — FONCTIONNEMENT ÉLECTRIQUE DES TUBES LUMINESCENTS.

Nous résumerons rapidement ce qu'on peut considérer comme connu au sujet du passage de la décharge dans les gaz, en distinguant

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre le Mardi 22 octobre 1929.

(2) C. R. 12 déc. 1910.

(3) Zeits. f. Physik, 41 (1927), 718.

(4) Technique Moderne, t. 19 (1927), n° 1.

les tubes à cathode froide et les tubes à cathode incandescente, les tubes Claude à néon et mercure étant du premier type.

Passage du courant dans un tube à cathode froide. — Pour obtenir une étincelle dans un gaz entre deux électrodes froides, il faut disposer d'une différence de potentiel qui dépend de la pression du gaz ; cette différence de potentiel est minimum pour une certaine pression. Quand les électrodes sont planes, parallèles et assez rapprochées, on peut dire que le champ entre les électrodes est uniforme ; dans ce cas,

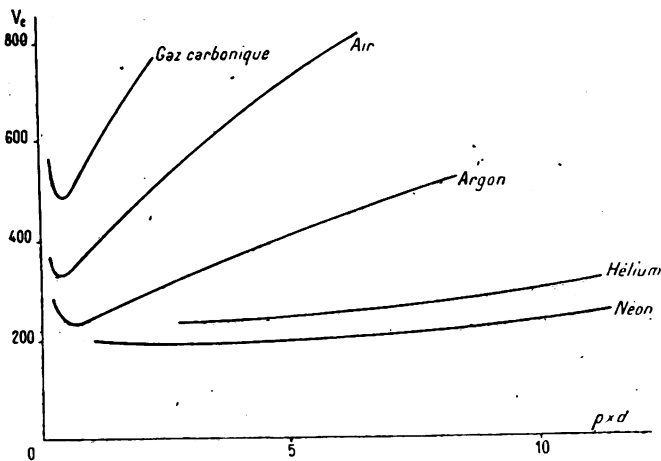


Fig. 1. — Tension explosive dans les gaz.

Cette courbe donne en abscisse le produit de la pression du gaz par la distance des électrodes, en ordonnée la tension explosive du gaz.

PASCHEN a montré que le voltage explosif ne dépend que du produit $p \times d$ de la pression par la distance des électrodes. Les courbes de la figure 1, représentent les variations de la tension explosive pour divers gaz en champ uniforme avec électrodes de nickel (TOWNSEND, 1928). On remarque sur la figure : 1° que la tension minimum varie avec le gaz : 340 V pour l'air et 185 V pour le néon ; 2° que la variation avec la pression est très faible pour le néon et l'hélium. D'après les recherches étendues de BOUTY (1910 environ), on aurait, à droite du minimum de pression et assez loin de ce minimum :

$$V_e = A + Cp.$$

Le coefficient C est la cohésion diélectrique ; les valeurs suivantes de C sont empruntées, partie à BOUTY, partie à MM. LEPAPE et M. CURIE (1).

(1) M. CURIE et A. LEPAPE C. R. 187 (1928), 1283.

Gaz	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Air	H ²	Hg vapeur
C	1,98	0,63	2,00(?)	4,14	13,12	39,8	20,5	35,4

(champs en volt : cm ; pressions en mm de mercure).

Le néon est, de tous les gaz connus, celui qui est le plus facilement traversé par une étincelle à haute pression. MM. LEPAPE et CURIE ont donné une explication sommaire de la faible cohésion diélectrique des gaz rares et promis un mémoire plus complet ; en principe la faible cohésion a sa source dans les chocs entre électrons (ou ions) et atomes du gaz ; ces chocs sont élastiques avec les atomes normaux (V. plus loin), ce qui permet une totalisation d'énergie plus rapide pour la particule électrisée. La variation de la cohésion avec le poids atomique du gaz rare ferait intervenir les chocs avec atomes anormaux (V. plus loin ce mot).

Les tubes luminescents fonctionnent pour une pression gazeuse supérieure à celle du minimum de la courbe de Paschen. Supposons le tube alimenté en courant continu ; la luminosité a l'aspect de la figure 2. La partie éclairante est la colonne positive C, elle s'étend en pratique sur tout le tube, le reste tenant dans quelques centimètres. L'espace sombre E₁ est celui de Faraday ; la lueur négative L est séparée de la cathode par l'espace sombre de Crookes E₂. Sur la cathode elle-même est une lueur qui peut être aussi à quelque distance du métal (1).

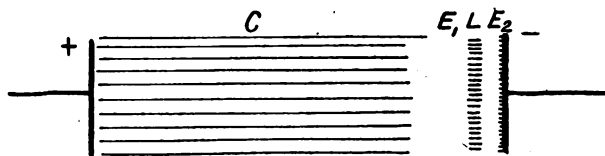


Fig. 2. — Luminosité d'un tube.

La théorie du fonctionnement électrique des tubes luminescents exige la connaissance du champ électrique aux divers points du tube. Ce champ a été mesuré par divers procédés : 1° en évaluant à l'aide d'électrodes auxiliaires (sondes), la différence de potentiel entre un point quelconque du tube et l'une des électrodes ; on déduit de ces mesures la valeur de $\frac{dv}{dx}$ c'est-à-dire du champ électrique dans le tube ; 2° un rayon cathodique transversal traverse le tube ; on déduit le

(1) Ce nouvel espace sombre a été signalé par Aston pour He et H² ; il est probable (V. plus loin) qu'il est observable aussi pour le néon aux pressions de l'ordre du mm.

champ de la déviation du rayon ; 3° on mesure l'élargissement des raies spectrales émises par le tube ; les deux derniers procédés ne conviennent que pour les forts champs. Les trois procédés sont d'accord pour fournir une courbe du champ représentée par la figure 3. Le champ varie rapidement dans le voisinage des deux électrodes, surtout

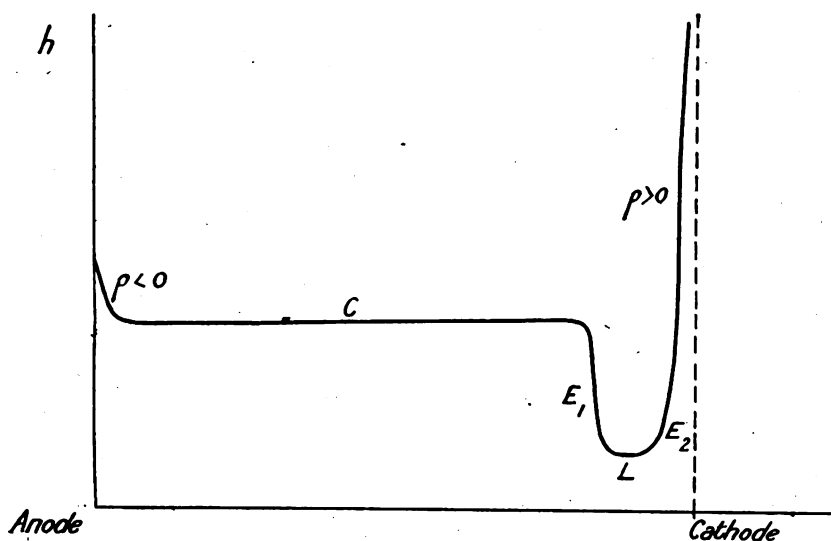


Fig. 3. — Courbe du champ dans le tube.

de la cathode ; constant dans la colonne positive, il est minimum dans la lueur négative. En se rappelant que $h = -\frac{dv}{dx}$, on passe facilement de la courbe du champ à la courbe des potentiels ; le potentiel subit une chute brusque à l'anode et une autre plus considérable à la cathode ; il varie linéairement dans la colonne positive. De plus, la formule de Poisson, qui s'écrit ici :

$$\frac{dh}{dx} = 4\pi\rho,$$

montre que, au voisinage de l'anode, il y a une charge spatiale négative, près de la cathode une charge positive ; dans la colonne positive, une charge nulle.

Dans un tube assez large où l'électrode est loin des parois, la lueur négative se développe tout autour de l'électrode et la chute cathodique est alors indépendante de la température et de la pression ; c'est la *chute normale*. Le champ correspondant se révèle comme indépendant de la nature de l'électrode. Si, au contraire, l'électrode est logée

au fond d'un tube étroit, la chute cathodique est anormale ; elle dépend de la pression et de la densité du courant. Dans ce cas, d'après BROSE ⁽¹⁾, le champ dans le voisinage de la cathode aurait la forme représentée par la figure 4 ; on admet que ce résultat s'applique aussi qualitativement à la chute normale.

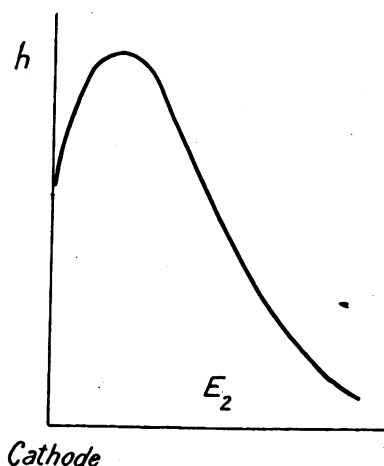


Fig. 4. — Chute cathodique anormale du champ.

D'après la figure 3, le champ dans le tube en fonctionnement est loin d'être uniforme, même avec deux électrodes parallèles et rapprochées ; la concentration du champ près de la cathode a une conséquence importante : la tension aux bornes du tube en fonctionnement est inférieure à la tension explosive, elle peut même être très inférieure et elle diminue quand on augmente le courant.

Ces résultats d'expérience doivent être interprétés par la théorie. En fait, on a vu apparaître depuis les études sur l'ionisation des gaz, diverses théories de la décharge ; elles ont été poussées plus ou moins loin au point de vue quantitatif. Ces diverses théories ont quelques points communs : toutes admettent que, sur la cathode ou dans son voisinage immédiat, il y a émission d'électrons ; le mécanisme de cette émission est assez obscur dans la décharge avec cathode froide. Ces électrons sont accélérés par la chute cathodique et deviennent capables d'ioniser par choc les molécules ou atomes de gaz, dès que leur énergie cinétique dépasse une certaine valeur, pour donner des ions positifs moins mobiles, mais beaucoup plus lourds, qui voyagent vers

(1) *Ann. der Physik.* 58 (1919), 731.

la cathode et l'atteignent avec de grandes énergies cinétiques. C'est peut-être l'impact de ces ions positifs sur la cathode qui donne naissance aux électrons de départ. Dans la lueur négative, les ions positifs et les ions négatifs ont une vitesse faible ; les ions négatifs continuent vers l'anode, reprennent de la vitesse dans l'espace sombre de Faraday et redeviennent capables d'ioniser de nouveau le gaz à l'extrémité de la colonne positive. Dans celle-ci il y aurait à peu près autant d'ions positifs que d'ions négatifs. La véritable partie active de la décharge serait la chute cathodique où les ions positifs et les ions négatifs seraient produits.

Les théories proposées diffèrent surtout, quant au mode d'action des ions positifs. TOWNSEND suppose que ces ions positifs prennent une part active à l'ionisation et que cette part devient très grande dans les grands champs ; l'augmentation de courant correspondante déterminant une véritable « avalanche » d'ions au voisinage du potentiel explosif. La théorie de TOWNSEND permet de rendre compte quantitativement de l'existence du potentiel explosif, au moins dans un champ primitif uniforme ; elle donne aussi la diminution de la tension aux bornes quand le courant est établi. Elle n'explique pas cependant certains faits d'expérience ; elle demande, en effet, pour l'apparition de courants de l'ordre de l'ampère, un temps d'au moins 10^{-4} seconde et les oscillogrammes de la décharge indiquent des temps beaucoup plus petits (1).

GÜNTHERSCHULZE a proposé une autre théorie (2) ; il suppose toujours que, quand on met la tension sur le tube, les quelques électrons présents dans le tube (par effet de l'ultra-violet sur la cathode ou de la radiation pénétrante sur les molécules du gaz) sont entraînés par le champ vers l'anode ; après un parcours suffisant, un électron peut ioniser le gaz, créant N paires d'ions entre les 2 électrodes ; les cations (ions positifs) vont vers la cathode, ils y arrivent après avoir subi un certain nombre de collisions avec les molécules du gaz ; l'auteur (et beaucoup d'autres pensent actuellement comme lui), croit que les cations n'ionisent pas le gaz. Il calcule l'énergie avec laquelle les cations arrivent à la cathode ; on trouve ainsi qu'en moyenne, pour un électron initial parti de la cathode, il arrive par exemple $N = 20$ cations pour une différence de potentiel de 500 V et un parcours entre électrodes égal à 100 fois le chemin moyen. Sur ces 20 cations, 5 ont en

(1) Cf. en particulier W. ROGOWSKI. *Arch. f. Electrotechnik*, 17 et 18 (1927).

(2) *Zeits. f. Physik*, 33 (1925), 810.

moyenne une énergie supérieure à 30 V. Si on admet qu'il faut au moins une énergie de 30 V pour enlever un électron à la cathode et que 10 pour cent des chocs sont efficaces, le nombre d'électrons créés à la cathode est $n = 0,5$. Si la tension augmente, N croît vite, n beaucoup plus vite ; tant que n reste inférieur à 1, le courant est toujours déterminé par la cause initiale (rayons ultra-violet, ou radiation) ; dès que n devient supérieur à 1, le courant peut s'accroître rapidement à potentiel constant. On prévoit alors l'apparition d'un régime d'instabilité dans la décharge : 1° une accumulation des cations vers la cathode ; 2° une augmentation de la densité des électrons de C vers A, les deux causes donnant les champs observés vers les électrodes ; 3° la formation d'une région où les électrons se sont assez multipliés pour contrebalancer l'effet des charges positives, cette région étant à la limite de la lueur négative. Le même auteur a pu calculer le nombre d'électrons secondaires dans les différentes parties de la décharge ; on trouve ainsi de fortes densités électroniques dans la lueur positive ; ces électrons peuvent diffuser vers l'espace sombre où leur densité est très faible, de sorte que la région de champ très faible serait due : 1° à l'arrivée des électrons formés dans la chute cathodique ; 2° à la diffusion des électrons de la colonne positive.

Cette colonne positive est la partie vraiment lumineuse de la décharge ; son étude a un grand intérêt au point de vue pratique. GÜNTHERSCHULZE ⁽¹⁾ a mesuré le gradient de potentiel dans la colonne positive pour les gaz suivants : N^2 , H^2 , Ne, O^2 , He, Ar, Kr, Xe, l'air, les vapeurs d'eau et de mercure. D'une façon générale la relation :

$$\text{Grad} = C \frac{\lambda^{m-1}}{r^m} \quad (1)$$

s'applique pour les gaz polyatomiques quel que soit le courant ; λ désigne le chemin moyen des molécules, r le rayon du tube. Pour tous les gaz polyatomiques étudiés, on aurait $m = 1/3$. Pour les gaz monoatomiques, qui nous intéressent surtout ici, la relation (1) s'applique avec $m = 1$ tant que $\frac{i}{r} = C^{10}$; quand i varie, on a la relation empirique :

$$\text{Grad} = C \frac{\lambda^0}{r \left(1 + a \frac{i}{r} \right)} \quad (2)$$

Ces relations ne s'appliquent d'ailleurs que dans certaines limites

(1) *Zeits. f. Physik*, 41 (1927), 718 et 42 (1927), 763.

pour le diamètre des tubes et la pression. Dans le cas du néon, on retrouve ainsi un résultat annoncé par CLAUDE ⁽¹⁾ : le gradient de potentiel est inversement proportionnel au diamètre. Ce résultat avait déjà été obtenu auparavant par WILLS pour le mercure ⁽²⁾.

Les résultats précédents ont été exposés pour des tubes alimentés en courant continu ; avec une tension alternative, le rôle des 2 électrodes s'inverse à chaque changement de signe de la tension aux bornes ; il y a donc, dans ce cas, deux chutes moyennes aux deux électrodes et une chute proportionnelle à la longueur dans la colonne positive. Dans les tubes au néon de 11 mm de diamètre, on compte 350 V pour les deux électrodes et 650 V par mètre de tube pour le fonctionnement normal, l'allumage demandant une tension près de deux fois plus forte que la tension de régime. La forte chute cathodique est essentielle pour le fonctionnement du tube à cathode froide ; son existence entraîne les inconvénients connus : 1° il est impossible, même avec le néon, de construire un tube à basse tension ; 2° pour avoir un bon rendement lumineux, il faut employer de longs tubes, afin que le rapport de la chute cathodique à la tension totale soit aussi faible que possible, ce qui oblige à l'emploi de tensions de plusieurs milliers de volts. Les tubes à néon-mercure ou argon-mercure où l'allumage a lieu dans le gaz rare, et le fonctionnement normal dans la vapeur de mercure, sont du même type et ont les mêmes inconvénients.

Il est probable que la pulvérisation du métal des électrodes est aussi liée à la forte chute cathodique, GÜNTHERSCHULZE a aussi étudié cette question dans deux mémoires ⁽³⁾ ; pour lui, la pulvérisation normale serait « une diffusion du gaz métallique produit par choc des cations » ; avec des électrodes d'argent dans H^2 , il a constaté que la quantité de métal pulvérisée était proportionnelle à la chute cathodique, lorsque le courant est constant et que la distance entre électrodes est un multiple constant de l'épaisseur de l'espace sombre cathodique. Pour les tubes au néon du type Claude, on sait les difficultés éprouvées au début ; elles ont conduit à adopter de grosses électrodes de cuivre qui réduisent la densité de courant et la pulvérisation. On sait aussi que la disparition lente du gaz rare est liée à cette pulvérisation ; c'est aussi le cas de l'hélium, pour lequel on a même

(1) C. R. 157 (1913), 432 et 158 (1914), 479. Une 3^e communication [C. R. 158 (1914), 692] donne des nombres qui contredisent la loi énoncée.

(2) *Phys. Rev.*, 19 (1904), 65.

(3) *Zeits. Physik* 36 (1926), 563 et 38 (1926), 575.

essayé de mettre en évidence des combinaisons hélium-métal ⁽¹⁾. La diminution de la chute cathodique doit réduire la pulvérisation et la disparition du gaz; d'après une communication de M. ABADIE ⁽²⁾, on obtiendrait ce résultat dans ses tubes au néon qui utilisent des électrodes au cadmium. Ce point serait intéressant à élucider dans la discussion. On constate en tout cas que, dans ces conditions, un point lumineux apparaît sur l'électrode; ce point est analogue à celui que l'on voit sur la cathode des tubes Cooper Hewitt à mercure, qui fonctionnent nettement comme des tubes à cathode chaude.

Tubes à cathode chaude. — Dans ce genre de tubes, la cathode tout entière ou l'un de ses points seulement sont maintenus à une température suffisante pour produire des électrons par effet thermoionique.

On peut ranger d'abord dans ce groupe le tube Cooper-Hewitt à vapeur de mercure, avec cathode de mercure et anode de fer; l'allumage par basculement de ce tube ressemble exactement à celui d'un arc au charbon; le court-circuit initial entre les deux électrodes crée sur la cathode un point très chaud d'où partent des électrons. Le mécanisme de passage du courant reste en gros celui décrit plus haut, avec une différence essentielle: la chute cathodique n'est plus de quelques centaines de volts, mais de quelques volts seulement, 5 V environ.

Pour un courant de 3 à 4 A, l'énergie correspondante de 15-20 V est dépensée dans la tache cathodique; celle-ci reste très chaude, probablement, grâce à la mauvaise conductibilité calorifique du mercure. On sait que la cathode ainsi chauffée peut servir de soupape pour le courant alternatif; nous ne reviendrons pas sur le montage des lampes à vapeur de mercure pour le courant alternatif; on le retrouvera à propos des tubes au néon à cathode chaude.

On pouvait croire que l'existence de ces propriétés rectificatrices de l'arc au mercure contredisait l'existence de lampes au mercure à deux électrodes, fonctionnant sur courant alternatif. M. LEBLANC et moi, nous avons montré qu'on pouvait faire fonctionner un tel arc avec deux électrodes de mercure ⁽³⁾; il faut que la pression de vapeur dans l'arc soit assez grande; les électrodes ont alors une température élevée. L'arc s'éteint à chaque alternance; il se rallume si l'élec-

(1) DAMIANOVICH, Réunion Internat. de Physico-Chimie, Paris (octobre 1928).

DAMIANOVICH et TRILLAT, *C. R.* 188 (1929), 991.

(2) Séance du 16 avril 1929 de la 2^e Section de la Société française des Electriciens.

(3) *Bulletin de la Société Française des Electriciens* (1914).

trode qui va devenir cathode est assez chaude pour émettre des électrons. Les courbes de la figure 5, représentent la variation avec le temps de la tension aux bornes de l'arc et de l'intensité du courant ; celle-ci est nulle pendant l'intervalle de temps compris entre les

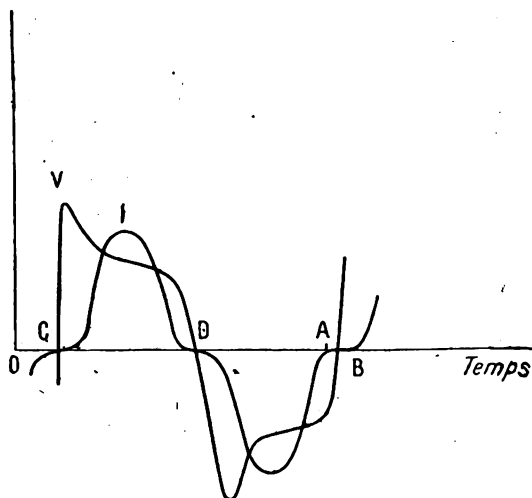


Fig. 5. — Courbe de la tension aux bornes et du courant dans l'arc au mercure alternatif.

V, courbe de la tension en fonction du temps ; I, courbe de l'intensité du courant en fonction du temps.

points A et B, l'arc est alors éteint. Il se rallume quand la tension atteint la valeur représentée par la pointe de la courbe. Le premier allumage de l'arc s'effectue par une étincelle jaillissant d'un pôle à l'autre, exactement comme dans les tubes au néon. M. GEORGES a réa-

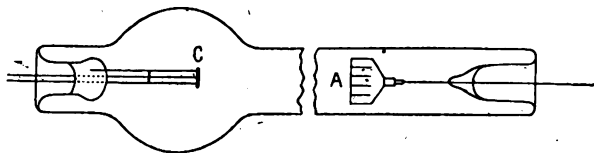


Fig. 6. — Tube à néon à cathode chaude pour courant continu.

lisé de telles lampes avec remplissage au néon, ce qui permet l'allumage à froid. Le tube à mercure en silice fondue de ce type est une source d'ultra-violet de puissance considérable.

On a publié récemment dans la littérature américaine des indications sur le prochain lancement des tubes à néon à cathode chaude (1).

(1) *Trans. Ill. Eng. Soc.* 24 (1929) 76.
Trans. Ill. Eng. Soc. 24 (1929) 76.

La cathode est un filament ou un ruban porté à l'incandescence et qui émet des électrons par effet thermoionique ; on réduit ici de nouveau la chute cathodique à quelques volts et le fonctionnement devient tout à fait analogue à celui des tubes Cooper-Hewitt.

La figure 6 représente le tube pour courant continu. Les deux fils de la cathode sont destinés au chauffage ; l'un d'eux est connecté au pôle — du secteur ; l'anode est reliée au pôle +. Pour l'allumage, on a repris les procédés utilisés pour les tubes Cooper-Hewitt, en particulier l'allumage par étincelle d'induction schématisé, figure 7. Pour courant alternatif, le montage est celui du convertisseur à vapeur de

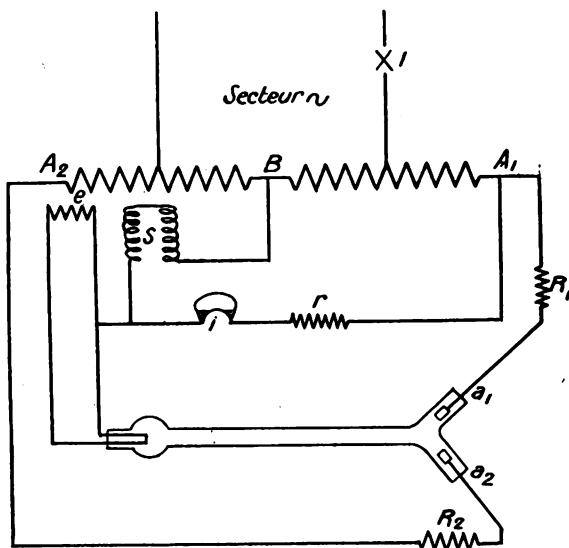


Fig. 7. — Montage d'un tube à néon à cathode chaude en distribution à courant alternatif.

mercure représenté figure 7. Le tube porte deux anodes a_1 et a_2 , reliées aux extrémités A_1 et A_2 de l'enroulement secondaire d'un auto-transformateur ; le point milieu B de l'enroulement est relié à la cathode. Le chauffage de celle-ci est assuré par un enroulement auxiliaire e du même transformateur. Un circuit dérivé, comprenant l'interrupteur à mercure i , la résistance r et la self S , laisse passer environ 1 A quand on ferme l'interrupteur I . La self agit aussitôt comme électro-aimant pour couper l'interrupteur i et l'énergie de self-induction accumulée dans S apparaît sous forme d'une étincelle qui jaillit à travers le tube sous une tension instantanée d'environ 2 000 V. L'arc une fois allumé, il passe alternativement par a_1 ou a_2 dans les deux

demi-périodes de la tension alternative ; les résistances R_1 , R_2 et la self S agissent pour régler la valeur du courant.

Les mesures électriques effectuées sur ces tubes montrent que la chute cathodique est environ 25 V, la chute anodique pratiquement nulle ; on retrouve la chute régulière dans la colonne lumineuse.

II. — CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES TUBES LUMINESCENTS.

Nous avons déjà insisté dans ce qui précède sur la tension aux bornes et, en particulier, sur la grande différence qui existe entre la tension explosive et la tension en fonctionnement. Il faut se rappeler aussi qu'à chaque alternance le tube s'éteint pendant un temps appréciable, et ce n'est que quand la tension aux bornes a repris une valeur suffisante qu'il se rallume. Les courbes de tension et de courant doivent être assez analogues pour tous les tubes à celles données plus haut pour les brûleurs à mercure. Ces courbes sont très différentes d'une sinusoïde ; on prévoit que, bien que le courant et la tension s'annulent en même temps, le facteur de puissance de l'installation doit être faible. C'est ce que l'expérience confirme.

Une statistique a paru récemment en Amérique ⁽¹⁾ où on rend compte des conditions de fonctionnement de tubes au néon de diverses longueurs et de différentes sections. Le facteur de puissance observé a varié de 0,34 à 0,73, la moyenne dans 42 installations étant 0,410 pour les tubes de 12 mm de diamètre et 0,476 pour ceux de 15 mm. Il est facile de prévoir que le facteur de puissance doit être à peu près égal au quotient des volts efficaces aux bornes du tube par les volts efficaces du secondaire du transformateur à vide ; des mesures effectuées autrefois sur les tubes à mercure avec M. LEBLANC, ont montré l'exactitude de cette relation.

Cette faiblesse du facteur de puissance est un défaut sérieux de l'éclairage par tubes luminescents. On y remédie par différents artifices : 1° le consommateur allume généralement, en même temps que ses tubes, des lampes à incandescence qui accroissent la consommation de courant watté ; 2° l'expérience nous a montré que, dans les brûleurs à mercure, le facteur de puissance s'améliorait beaucoup aux régimes poussés ; ce résultat s'explique si on remarque que les chutes aux électrodes ont une importance relative moindre. Il est pro-

(1) H.-A. COOK : *Trans. Ill. Eng. Soc.*, t. 24 (1919), p. 133.

bable que cela doit avoir lieu aussi avec les tubes à néon à forte densité de courant.

Cette densité de courant avait été indiquée autrefois comme assez faible dans les tubes Claude. D'après une remarque de M. AYCOBERRY (1), on pourrait réaliser actuellement 200 milliampères dans un tube de 11 mm de diamètre, densité considérée comme considérable par M. ABADIE, pour les tubes du type Claude (1).

Il est certain que le facteur de puissance des installations sera grandement amélioré par l'adoption des tubes à cathode chaude.

III. — EMISSION DE LA LUMIÈRE ET PHOTOMÉTRIE DES TUBES LUMINESCENTS.

L'émission de la lumière dans les tubes luminescents s'explique à l'aide des principes de la théorie de BOHR. Les tubes donnent dans presque tous les cas nettement le spectre d'arc du gaz qui est celui de l'atome neutre ; on s'explique la production des radiations simples par la formation d'atomes instables ou « excités », où les électrons périphériques occupent des positions plus éloignées du noyau que dans l'état normal, non lumineux, du gaz. Le retour de ces électrons sur la trajectoire normale ou en tout cas sur des trajectoires d'énergie totale moindre s'accompagne de l'émission d'un rayonnement monochromatique déterminé par la relation :

$$h\nu = W_1 - W_2.$$

Ces principes expliquent la plupart des phénomènes lumineux observés dans les tubes et même des particularités comme l'espace sombre d'Aston, par exemple. Les électrons qui quittent la cathode ont une vitesse très faible et doivent parcourir une certaine distance avant d'atteindre le potentiel d'excitation correspondant à l'énergie de formation de l'atome instable d'énergie minimum. Dans ce parcours, il n'y a pas de lumière émise, d'où l'espace sombre d'Aston. A l'aide des potentiels d'excitation, on peut calculer la largeur de cet espace, on trouve, par exemple, pour la pression de 1 mm les résultats ci-dessous :

He	Ne	Ar	H ²	N ²
1,25	0,55	0,14	0,25	0,09 mm.

Cet espace doit donc être observable pour le néon.

(1) Séance du 16 avril 1929 de la 2^e Section de la Société Française des Electriciens.

La différence entre les potentiels d'excitation des différents gaz, rend compte du fait que la lumière du mercure peut remplacer celle du néon, quand la pression de vapeur du mercure est suffisante; le mercure a, en effet, une tension d'excitation très inférieure à celle du néon. Même remarque pour le spectre de l'azote qui apparaît facilement dans les gaz rares impurs.

La photométrie des tubes luminescents se heurte à quelques difficultés. D'abord, le tube est beaucoup trop long pour qu'on puisse le considérer dans n'importe quel montage comme une source ponctuelle; on se tire d'affaire en cachant la plus grande partie du tube avec un papier noir et en photométrant, par exemple, 10 cm du tube. On admet que l'intensité du tube est proportionnelle à sa longueur.

La principale difficulté est la coloration de tous les tubes luminescents; leur émission est nettement sélective. On sait que le mercure émet principalement les radiations de longueur d'onde 5 790,5; 5 769,5; 5 461; 4 358,5; 4 048,0 Å; le néon donne également un spectre discontinu limité aux régions rouge et jaune du spectre et dont le maximum est situé dans l'orangé vers 6 300 Å; l'hélium donne pratiquement une seule radiation jaune 5 876 Å. La comparaison directe de ces lumières avec celle des étalons à incandescence présente de grandes difficultés dont on retrouvera la trace dans les anciens travaux du Laboratoire Central. On arrive à des comparaisons beaucoup plus faciles en plaçant devant la lampe étalon un écran coloré convenable dont la teinte est choisie de façon à égaliser aussi rigoureusement que possible les deux teintes des plages du photomètre. Il faut mesurer une fois pour toutes le coefficient de transmission de l'écran. C'est cette méthode que M. Roux a décrite récemment à propos des tubes au néon (1), pour lesquels il emploie une cuve contenant un mélange d'acide sulfurique et de bichromate de potassium.

Les indications qu'on trouve au sujet du rendement lumineux des tubes Claude au néon sont assez variables; on ne peut guère qu'indiquer une valeur moyenne, de l'ordre de 1 bougie par watt total consommé. Les mesures effectuées sur les lampes à cathode incandescente indiqueraient une amélioration par rapport aux tubes Claude; on donne des rendements de 12 à 15 lumens par watt suivant la tension pour le courant continu et de 10 à 12 lumens pour le courant alterna-

(1) Séance du 8 janvier 1929 de la 2^e Section de la Société française des Electriciens.

tif. Le tube de 22 mm de diamètre pour 220 V aurait 1 m de long ; consommant 3 A, il donnerait à peu près 10 000 lumens.

Une question importante est la variation du rendement lumineux avec la pression du gaz ou de la vapeur. Elle a été mise hors de doute par COOPER-HEWITT et ses collaborateurs pour le mercure en 1902, et retrouvée par CLAUDE pour le néon. On sait que, pour le mercure, le rendement diminue quand on dépasse la pression de quelques millimètres de mercure ; le rendement passe par un minimum et augmente ; dans les lampes en silice fondue, où la pression est de l'ordre de l'atmosphère, il est devenu très supérieur au rendement aux basses pressions. Il ne semble pas qu'on ait jusqu'ici signalé quelque chose d'analogue pour le néon ; il est possible que l'usage des tubes à cathode chaude permette d'aborder la question. Ce point pourra aussi très utilement faire l'objet d'une discussion. L'incandescence semble pour le moment arrivée au maximum du rendement lumineux avec le tungstène dans un gaz inerte ; au contraire, on est encore très loin du rendement théorique maximum pour les tubes luminescents et c'est peut-être dans la voie ci-dessus qu'il faut chercher.

IV. — APPLICATIONS DES TUBES LUMINESCENTS.

Rappelons pour mémoire les tubes Moore à CO_2 donnant une lumière blanche qui supplée celle du soleil pour les échantillonnages délicats.

Les tubes luminescents servent surtout dans l'éclairage de réclame où leur emploi s'accroît tous les jours. Les teintes franches obtenues sont très frappantes ; avec des verres spéciaux, on a encore accru la diversité des couleurs disponibles.

M. ABADIE a appelé récemment (*loc. cit.*), l'attention de la 2^e Section sur l'emploi des tubes dans le balisage des routes d'aviation, où la couleur rouge du néon se voit très bien de loin, même dans le brouillard.

La faible cohésion diélectrique des gaz rares intervient aussi dans un certain nombre d'interrupteurs à gaz et de galvanoscopes.

LE REDRESSEUR RECTOX A OXYDE DE CUIVRE ⁽¹⁾

par M. Maurice LEBLANC.

Les phénomènes de redressement qui se produisent à la surface de contact de certains couples formés de deux corps métalliques de nature différente sont connus depuis longtemps, mais ce n'est que très récemment qu'ils ont reçu des applications industrielles importantes, particulièrement en T. S. F.

On a fourni de ces phénomènes diverses explications; celle qui a eu le plus de succès est basée sur la théorie électronique des métaux. Mais il nous semble que si on explique parfaitement ainsi la différence de potentiel au contact de deux métaux, on est impuissant à fournir une explication satisfaisante du phénomène de redressement.

Rappelons brièvement en quoi consiste cette théorie :

On admet en première approximation que les atomes des corps conducteurs émettent spontanément des électrons et que ceux-ci évoluent au milieu des ions positifs ainsi formés et des atomes demeurés neutres. Ils constitueraient ainsi un fluide électronique auquel on peut appliquer les relations classiques de la théorie cinétique des gaz. Certains de ces électrons, par l'effet de leur vitesse d'agitation, peuvent franchir la surface libre du métal. En quittant ce dernier ils y laissent derrière eux un nombre égal de charges positives libérées dont l'attraction limite leur course à une certaine distance de la surface du métal et les y rappelle ensuite. On atteint ainsi un état d'équilibre dans lequel le métal se trouve enveloppé d'une atmosphère d'électrons dont la densité décroît au fur et à mesure qu'on s'en éloigne. Cette densité croît rapidement quand la température du métal s'élève, comme l'ont mis en évidence les phénomènes d'émission thermo-électronique. Elle est également d'autant plus grande que le métal est meilleur conducteur, c'est-à-dire qu'il contient plus d'électrons libres par centimètre cube.

Si on admet que les vitesses des électrons à la sortie du métal sont

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine d'octobre, le mercredi 23 octobre 1929.

réparties suivant la loi de MAXWELL, on peut tracer une courbe dont les abscisses représentent les distances à la surface libre idéale du métal d'une série de plans parallèles à cette surface et les ordonnées le nombre d'électrons qui, lorsque l'équilibre est atteint, traversent ce plan dans les deux sens. Ces courbes ont l'allure de celle de la figure 1.

Cette courbe présente une variation de courbure brusque, correspondant au plan le plus éloigné atteint par les électrons de la vitesse la plus probable. A partir de ce plan, la densité de l'atmosphère électronique qui entoure le métal décroît rapidement de telle sorte que bien que cette atmosphère soit théoriquement illimitée, on peut en pratique cependant la considérer comme limitée à ce plan.

Considérons maintenant deux surfaces métalliques parallèles, situées à une distance X et traçons les deux courbes 1 et 2 (figure 2) représen-

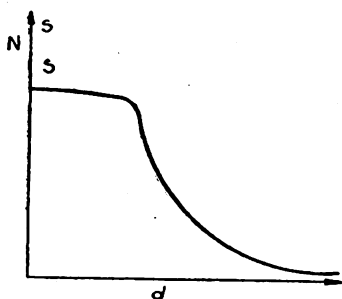


Fig. 1.

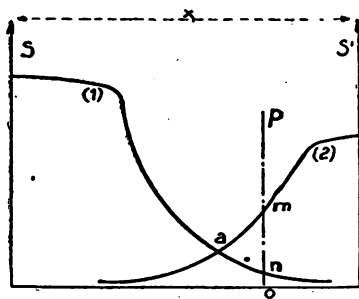


Fig. 2.

tant dans l'espace compris entre ces plans la répartition des électrons émis par les deux conducteurs. Ces courbes se coupent en un point a . — Notons que chacune d'elles est modifiée par la présence du conducteur opposé. Les deux champs électriques de sens opposé, dus aux charges positives libérées dans le métal, sont égaux pour un certain plan p et leurs effets s'y annulent. Un électron, abandonné sans vitesse, à droite du plan p se dirige vers S' et s'il est à gauche vers S . Par conséquent, tous les électrons venant de S qui traversent le plan p , et dont la quantité est mesurée par l'ordonnée no , ne reviennent pas en arrière, de même les électrons venant de S' et dont la quantité est mesurée par l'ordonnée mo continuent leur route vers S . Il y a donc un excès d'électrons qui se dirigent vers S , et par suite les charges positives libérées sur S diminuent, tandis qu'elles augmentent sur S' .

Les courbes 1 et 2 se déforment et, lorsque l'équilibre est atteint, les deux courbes se coupent dans le plan p .

En même temps, il y a création d'une différence de potentiel entre S et S' (différence de potentiel au contact) le corps au potentiel le plus élevé étant celui dont l'émission électronique est la plus abondante.

Si on veut passer à l'étude de la conductibilité dyssymétrique, cause du phénomène de redressement et qu'on établisse une différence de potentiel V entre les deux corps métalliques, on conçoit, sans d'ailleurs

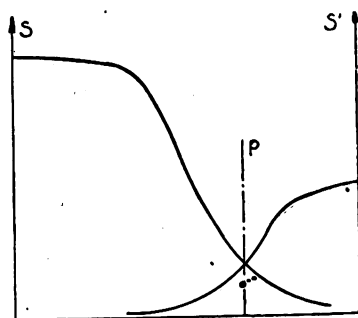


Fig. 3.

que l'analyse du phénomène permette d'arriver à une conception claire, que dans un certain sens le courant pourrait dépendre de $V + D$ et dans l'autre sens de $V - D$. On ne pourrait donc avoir une conductibilité dyssymétrique appréciable que lorsque V et D , sont voisins, ce que l'expérience ne vérifie pas.

Le redresseur à oxyde de cuivre dont nous nous occuperons particulièrement ici se compose essentiellement d'une rondelle de cuivre oxydée sur une ou deux de ses faces. L'ensemble constitue un redresseur de courant opposant au passage du courant une résistance environ mille fois plus grande dans le sens cuivre oxyde de cuivre que dans le sens inverse.

On distingue avec difficulté dans un tel redresseur les deux corps conducteurs séparés par un milieu isolant que nous avons considérés plus haut. Le cuivre peut être un de ces conducteurs, mais l'oxyde de cuivre est isolant. Comme nous le verrons plus loin, la température à laquelle ces rondelles sont produites est aussi celle de la formation du mélange eutectique cuivre-oxyde cuivreux; il n'est donc pas impossible que cet eutectique, qui ne paraît pas avoir été étudié au point de vue de sa conductibilité électrique, puisse être le second conducteur nécessaire.

Les créateurs de ce redresseur : MM. GRONDAHL et GEIGER (*Journal*

of the american institute of electrical engineers, mars et mai 1927), se sont rendus compte de ces difficultés et proposent de chercher l'explication du phénomène dans une autre direction. Des recherches récentes, sur les isolants montrent que ceux-ci peuvent, dans certains cas, se laisser traverser par des électrons et présenter des propriétés analogues à celles des vides imparfaits s'ils renferment dans leur masse un conducteur finement divisé, capable de fournir des électrons. Si la teneur en parcelles conductrices va en diminuant progressivement dans une certaine direction, on peut concevoir que la densité d'électrons libres à l'intérieur de l'isolant varie dans le même sens et qu'on puisse trouver dans cette dyssymétrie une explication du phénomène de redressement.

Fabrication des rondelles. — Les rondelles sont obtenues par chauffage à une température voisine de 1040° C. Le cuivre peut donner naissance à deux oxydes : l'oxyde cuivrique noir CuO , stable seulement à basse température, et l'oxyde cuivreux Cu_2O stable à haute température. De plus, le cuivre peut dissoudre de l'oxyde cuivreux pour donner un mélange dont le point de fusion est 1035° C, alors que celui du cuivre est 1065° C. Dans le refroidissement, la rondelle se recouvre d'une couche superficielle d'oxyde cuivrique dont on se débarrasse par sablage. Sur une des faces on met le cuivre à nu. Il est beaucoup plus difficile de prendre contact sur l'oxyde cuivreux. On peut le réduire partiellement par un procédé chimique. Cette couche de cuivre pur étant formée à partir de la couche originelle d'oxyde, en est une partie intégrante et avec elle en contact intime et d'une résistance électrique extrêmement faible.

On peut aussi prendre contact en appuyant fortement sur l'oxyde de cuivre une rondelle d'un métal malléable, tel que le plomb. La pression qu'on doit exercer est importante, la résistance au contact diminuant quand elle augmente; elle ne doit pas cependant dépasser une valeur susceptible de provoquer des fissures dans la couche d'oxyde.

Une des grandes difficultés de cette fabrication est l'obtention de rondelles ayant des caractéristiques électriques aussi voisines que possible les unes des autres, de manière à pouvoir être montées en série ou en parallèle avec une répartition égale du courant.

Montage des redresseurs. — Le redresseur proprement dit est constitué par un empilage de rondelles de cuivre oxydé et de rondelles de plomb percées d'un trou central et enfilées sur un tube isolant. Celui-

ci est traversé par une tige filetée et l'ensemble des rondelles est serré par des écrous et contre-écrous. L'ensemble a l'aspect de la figure 4. Les prises de contacts se font sur les rondelles de plomb et sur la face décapée de la rondelle oxydée. On peut interposer entre les rondelles de grands disques en cuivre rouge mince qui, en assurant un meilleur refroidissement, permettent d'augmenter le débit de l'appareil.

Les redresseurs à oxyde de cuivre Rectox, construits par la Société

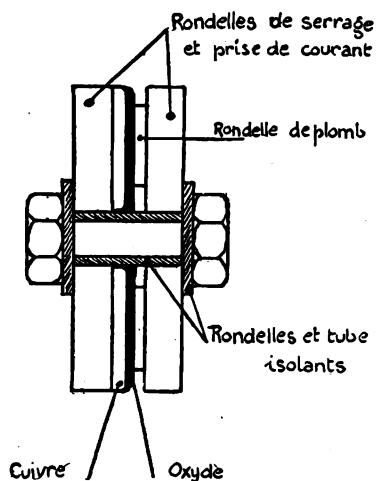


Fig. 4.

Anonyme Hewittic, utilisent deux types de rondelles, les unes d'une surface de $10,2 \text{ cm}^2$, les autres de $2,75 \text{ cm}^2$, pour des courants de 0,5 ampères et de 0,1 ampère nécessaires pour la charge des batteries d'alimentation des circuits de filaments et des circuits de plaque des postes de T. S. F.

L'élément redresseur est combiné avec un transformateur qui permet, à partir d'une tension alternative donnée, d'obtenir la tension continue désirée; on utilise généralement 4 éléments en pont de Wheatstone (fig. 5).

Caractéristiques des redresseurs à oxyde de cuivre. — En appliquant à un élément de redresseur à oxyde de cuivre des tensions variables, on peut en tracer les caractéristiques courant-tension. On trouve que ces caractéristiques dépendent assez notablement de la température de l'expérience.

Les figures 6 et 7 montrent les caractéristiques obtenues à diverses températures pour des rondelles de 10,2 cm.

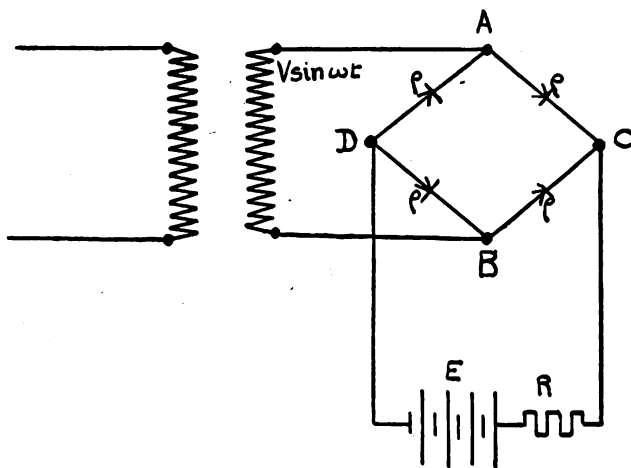


Fig. 5.

La figure 6 représente les caractéristiques courant-tension pour les

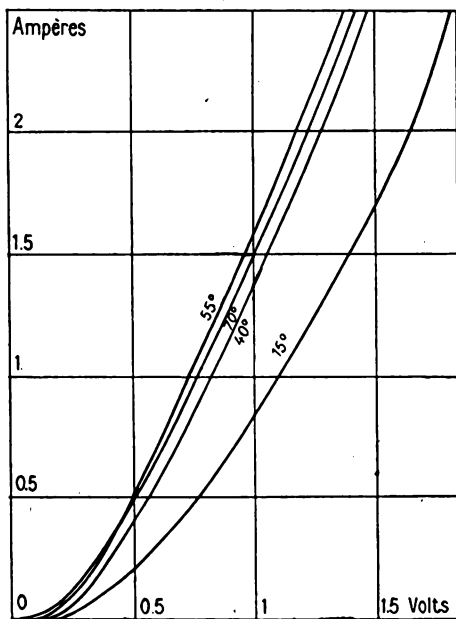


Fig. 6.

courants dirigés de l'oxyde au cuivre que nous appellerons par abrégé-

viation : courants directs; elle montre que si on élève la température, la résistance au courant direct commence par diminuer, passe par un minimum vers 50°C pour augmenter ensuite à nouveau.

La figure 7 représente les caractéristiques courant-tension pour les courants dirigés du cuivre à l'oxyde que nous désignerons sous le nom de courant de retour ou de courants inverses. Une augmentation de

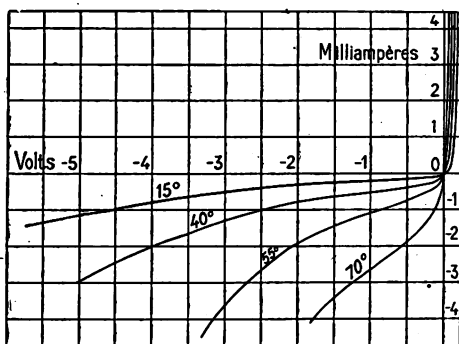


Fig. 7.

température cause une augmentation du courant de retour. L'échelle des intensités est ici 200 fois plus grande que dans la figure 6.

Il est par conséquent indispensable de ne pas dépasser un certain régime, environ 0,03 ampère par centimètre carré, correspondant à une température d'équilibre pour laquelle le courant de retour garde une valeur raisonnable. Une augmentation de ce courant entraînerait en effet une élévation de température, suivie elle-même d'un nouvel accroissement de courant et ainsi de suite; le phénomène irait en s'accroissant, jusqu'à déterminer la fusion des rondelles et un court circuit franc. Il est dangereux de dépasser une température de 70°C .

On appelle coefficient de redressement l'inverse du rapport de la résistance dans la direction utilisée à la résistance inverse. Aucun redresseur connu n'est absolument parfait et tous livrent passage à un petit courant dans la direction inverse. La valeur de ce courant inverse influe sur le rendement du redresseur et détermine la possibilité de son utilisation pour certaines applications particulières.

Pour la charge des accumulateurs, le coefficient de redressement tant qu'il est suffisamment haut n'intervient pas, si ce n'est dans la détermination du rendement.

Dans certaines applications, au contraire, telles que l'alimentation des récepteurs de T. S. F., les hauts parleurs électrodynamiques, les circuits téléphoniques, un courant inverse même relativement faible,

peut produire dans le circuit d'utilisation un bourdonnement ou d'autres bruits parasites gênants.

Dans le cas des redresseurs à oxyde de cuivre, le coefficient de redressement est toujours supérieur à 1 000, peut atteindre 10 000 et est d'une remarquable constance.

Celui du redresseur à sulfure de cuivre qui lui est souvent opposé n'est que de 75 pour un appareil nouvellement construit.

Le maximum de tension qu'un élément peut supporter est d'environ 4 V; une tension plus élevée donne lieu à un courant inverse important. Les courbes des figures 6 et 7, qui ont été spécialement vérifiées au voisinage de l'origine, montrent que pour les tensions de l'ordre d'une fraction de volt, les résistances dans les deux sens deviennent très grandes.

Le rendement global obtenu avec les redresseurs à oxyde est de l'ordre de 40 pour cent; il peut dans certains cas atteindre 75 pour cent, valeurs admissibles pour des appareils de puissance aussi faible.

Applications. — Le redresseur Rectox est particulièrement adapté à la charge des batteries de T. S. F. pour laquelle il a été spécialement créé. Il est également utilisé dans les appareils d'alimentation directe auxquels il confère une sécurité qui ne peut être obtenue avec des appareils à valve ou même de soupapes à liquides. Cette sécurité de fonctionnement l'a également imposé pour la charge des batteries de signalisation de chemins de fer.

En théorie, en groupant en série ou en parallèle un nombre suffisant de rondelles, on peut réaliser un redresseur pour un courant redressé de telle tension ou tel débit que l'on désire; en pratique on est rapidement conduit à des ensembles trop encombrants et trop coûteux et on ne prévoit pas actuellement la réalisation, par ce système, de redresseur de puissance élevée.

Les puissances maxima réalisées jusqu'à ce jour sont :

25 volts 40 ampères
300 volts 5 ampères
10 000 volts 100 milliampères.

LE FREINAGE ÉLECTRIQUE EN COURANT CONTINU DES TRAINS SUR PENTES⁽¹⁾

par M. L. GRATZMULLER.

I. *Généralités sur la récupération.* — II. *Genèse des schémas modernes.*
III. *Quelques schémas principaux.* — IV. *Conclusions.*

I. — GÉNÉRALITÉS.

Une étude soignée et documentée a été déjà présentée par M. KONN, à la Société Française des Electriciens.

La présente note a pour but l'exposé d'une tentative pour dégager les principes mis en jeu dans le freinage électrique avec récupération sur pentes aux vitesses normales.

Elle envisagera surtout les régimes transitoires rapides.

Sa rédaction a été faite dans l'espoir de provoquer les réflexions des ingénieurs de chemins de fer. C'est son but principal.

Il s'agit, bien entendu, de faire fonctionner en génératrices de puissance électrique les moteurs utilisés pour la marche motrice.

Nous supposerons d'abord, pour simplifier, qu'il n'y a qu'un moteur ou dynamo principale d'induit A et d'inducteurs B.

Si l'on appelle Φ le flux utile envoyé par les inducteurs à travers l'induit, la f. é. m. de rotation de cet induit est :

$$e = K\omega\Phi$$

K étant une constante.

Si I_1 est le courant à travers l'induit, la puissance de freinage est :

$$W = eI_1.$$

C'est cette puissance qu'il s'agit de renvoyer, pour la plus grande partie possible, au réseau d'alimentation, *supposé capable de l'absorber.*

On oppose donc, dans une même dérivation la force électromotrice e à la tension U du réseau. UI_1 est la puissance récupérée par le

(1) Cette communication sera discutée à la Semaine d'octobre le jeudi 24 octobre 1929.

réseau, entre le contact glissant et le rail au sol ; $(e - U)I_1$ est la puissance dissipée.

Nous distinguerons :

1° *Les régimes réguliers* où l'on suppose U variable très lentement dans le temps entre U_1 et U_2 . La pente aussi varie très lentement ;

2° *Les régimes transitoires rapides* où U varie rapidement entre U_1 et U_2 c'est-à-dire que la dérivée $\frac{dU}{dt}$ peut être grande.

En régime régulier :

$$I = \frac{e - U}{r + R}$$

r étant la résistance d'induit, R une résistance supplémentaire. Nous appellerons courants réguliers et tensions régulières les courants et tensions dans les différentes dérivations en régimes réguliers.

Il apparaît immédiatement que la difficulté du problème est due aux régimes transitoires et d'autant plus que $U_1 - U_2$ est grand avec $\frac{dU}{dt}$ grand.

Les variations de U et de $\frac{dU}{dt}$ dépendent :

1° De la faculté de réglage des sous-stations ;

2° De la chute ohmique et *inductive* de la ligne d'alimentation.

Tout le problème consiste à régler l'excitation des inducteurs de la dynamo principale ou, plus exactement, de son flux utile Φ envoyé à travers l'induit.

Lors d'un régime transitoire, la valeur instantanée du flux Φ ne dépend pas, uniquement, de la tension instantanée V aux bornes des inducteurs, mais aussi des valeurs antérieures.

Non seulement l'établissement du flux retarde sur celui de la tension, mais il peut même retarder par rapport à l'établissement des courants dans les inducteurs, par suite des courants de Foucault dans les masses magnétiques. On comprend donc qu'il faudrait qu'un mécanicien idéal, dans le genre du démon de Maxwell, fasse croître pendant le régime transitoire, la tension considérablement dans les inducteurs pour la ramener à la tension régulière aussitôt le flux régulier approximativement atteint.

Nous verrons que certains dispositifs tendent à ce but.

Dans une ligne de traction, en général, les puissances absorbées ou récupérées varient brusquement et les puissances ainsi mises en jeu sont grandes par rapport aux chutes de tension des lignes et aux fa-

cultés de régulation des sous-stations. De là, résulte l'importance des variations de U .

Récupération jusqu'à l'arrêt. — Pour récupérer, e devant être plus grand que U et le flux Φ étant limité, il en est de même de c .

Il est donc impossible de freiner avec récupération jusqu'à l'arrêt en intercalant simplement l'induit A dans une dérivation sur la tension U .

Il faut, sur le véhicule, réaliser un poste de transformation à tension réglable à volonté depuis une tension maximum égale à celle du réseau jusqu'à zéro.

Cette transformation a déjà fait l'objet de communications à notre Société. Elle a été obtenue par les moyens suivants :

1° Par transformateur moteur-générateur tournant de WARD LÉONARD ;

2° Par utilisation des tensions aux bornes secondaires d'un diviseur de tension ou égalisatrice. — FERRAND, SOMAJNI, DELLA RICCIA.

La tension entre bornes consécutives du diviseur de tension peut même être variable progressivement. — DELLA RICCIA.

3° On peut utiliser un groupe moteur-générateur, le générateur fonctionnant en survolteur-dévolteur de la tension du réseau ;

4° On peut transformer la distribution à tension approximativement constante du réseau en distribution à courant approximativement constant sur le véhicule, distribution dans laquelle on intercale la génératrice principale qui peut alors fonctionner en génératrice série suivant les idées générales émises par BOUCHEROT et THURY.

C'est l'idée générale dont M. PESTARINI a trouvé une réalisation si originale. Les difficultés de commutation à résoudre sont alors reportées de la dynamo principale au transformateur.

Mais, quel que soit le but envisagé, régulation jusqu'à l'arrêt ou simplement, régulation de la vitesse sur pente, la même difficulté subsiste tout au moins pour les solutions 2 et 3, c'est que la tension U peut rapidement varier.

Elle subsiste même pour le moteur du groupe Ward Léonard, mais peut être facilement résolue.

Les caractères communs de la récupération sur pente et de la récupération jusqu'à l'arrêt m'ont paru devoir être signalés.

Commutation en récupération. — Les surintensités dans la dériva-

tion comportant l'induit du moteur de traction sont surtout à redouter au point de vue commutation.

Les variables indépendantes sont la pente et la tension U du réseau. On aurait pu se proposer de les utiliser pour la régulation de la puissance de freinage W .

D'autres variables, fonctions des variables indépendantes, sont la vitesse du véhicule ou, proportionnellement, la vitesse de rotation du moteur, ω .

Nous verrons qu'on ne choisit pas la vitesse ω seule pour influencer l'excitation des inducteurs, parce qu'elle est lentement variable à cause de l'inertie des masses en mouvement.

L'intensité I_1 dans l'induit de la dynamo principale, est aussi fonction des variables indépendantes et c'est, à cause de la commutation, la variable à limiter dans les régimes transitoires, c'est pourquoi on la choisit elle-même comme agent de régulation.

On pourrait aussi choisir la variation du courant I_2 d'une dérivation, si I_1 parcourt plusieurs dérivations. C'est une solution possible et employée.

Mais, dira-t-on, c'est la vitesse du véhicule qu'il faut limiter. Mais c'est une préoccupation relativement secondaire. Le mécanicien de locomotive électrique est entraîné à surveiller la vitesse, cela est nécessaire, même dans la marche motrice avec les moteurs série.

En passant, remarquons que, dans la marche motrice, les surintensités ne sont pas à redouter parce que la variation de l'excitation série limite l'appel de courant I_1 , sur la ligne, quelle que soit pratiquement la rapidité de variation de la tension du réseau, on pouvait prévoir, qu'il doit être possible en récupération, de varier suffisamment vite le courant des inducteurs par la tension disposée à leurs bornes, à condition d'obtenir cette tension convenable.

De plus, en récupération, dans le régime transitoire rapide, la self-inductance de l'induit principal limite la rapidité de variation du courant I_1 qui le traverse. Les ampère-tours d'induit sont grands et le flux de l'induit se ferme en grande partie par les pôles principaux qui sont feuilletés; par suite, les courants de Foucault limitent peu les variations de la fraction du flux de l'induit principal non compensé par les pôles auxiliaires; d'ailleurs, les flux de fuite des pôles auxiliaires peuvent être considérés comme faisant partie de la self-inductance de l'induit.

Enfin, on peut encore remarquer que les variations relatives de I_1

en récupération, n'ont pas besoin d'être très considérables pour que la puissance de retenue eI_1 reste d'un ordre de grandeur appréciable pour éviter un emballement *rapide*.

On n'a donc pas à se préoccuper exagérément de la variation instantanée de la puissance $W = eI_1$ car e est approximativement égale à U et U ne varie que dans des limites assez rapprochées.

Enfin, d'après le principe même de régulation utilisant I_1 , le courant I_1 croît si U décroît.

Autrement dit, la difficulté étant plutôt de limiter les accroissements de signes contraires de U et de I_1 , le produit UI est dans une certaine mesure conservé.

Le mécanicien aura donc le temps d'agir pour modifier la vitesse.

Si, à cause de la commutation, il importe que les ampères-tours inducteurs correspondent à des valeurs assez grandes du flux soit, plus exactement, du rapport acceptable des ampères-tours inducteurs aux ampères-tours d'induit, rapport acceptable différant d'ailleurs avec la constitution du moteur, il y a aussi une autre préoccupation. Puisque $e > U$ en récupération et que U peut être grand puisque la chute de tension peut s'inverser dans la ligne, du fait de la récupération, il faut aussi s'inquiéter de ne pas atteindre une valeur exagérée de Φ et par suite des ampères-tours inducteurs.

Mais tandis qu'en traction motrice, toutes les puissances passives, frottements, hystérésis, courants de Foucault, résistances de l'air, etc... doivent être fournies mécaniquement par la puissance $W = eI_1$, elles sont à retrancher dans la période de freinage. De là, une réduction de eI_1 qui jointe à l'augmentation relative de e diminue beaucoup la valeur nécessaire de I_1 , de sorte que $W = eI_1$, en période de freinage, dépassera rarement 0,6 à 0,7 de la valeur de W en marche motrice.

On pourra se contenter de n'utiliser qu'une partie de la pleine puissance de freinage des moteurs W . On pourra aussi réaliser plusieurs dérivations d'induits principaux en série dans chaque dérivation. Cela sera même imposé parfois par la réduction demandée de la vitesse en pente.

Notons que le fait de limiter la tension par collecteur à une fraction de la tension U du réseau diminue l'unité de tension par collecteur, dont on peut jouer en utilisant différents couplages. C'est un bénéfice qui peut compenser parfois l'augmentation des surfaces frottantes des balais aux collecteurs.

Expression de l'accroissement relatif de la différence $A - B = u$ de 2 nombres positifs A et B en fonction des accroissements relatifs de ces deux nombres. — On suppose $A > B$. Exprimons les 2 nombres A et B en fonction de leur différence. Pour cela posons :

$$A - B = u$$

$$B = mu$$

$$A = (m + 1)u$$

m étant un nombre positif. Nous aurons successivement, Δ désignant un accroissement :

$$\Delta u = \Delta A - \Delta B,$$

$$\Delta u = \frac{\Delta A}{A} (m + 1)u - \frac{\Delta B}{B} mu,$$

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta A}{A} (m + 1) - \frac{\Delta B}{B} m.$$

Posant :

$$m' = \frac{1}{m},$$

on aurait :

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta A}{A} \left(\frac{1}{m'} + 1 \right) - \frac{\Delta B}{B} \frac{1}{m'}.$$

L'accroissement relatif $\frac{\Delta u}{u}$ de la différence de 2 nombres positifs A et B est égal à la différence des accroissements relatifs $\frac{\Delta A}{A}$ et $\frac{\Delta B}{B}$ de 2 nombres multipliés tous deux respectivement par les rapports $\frac{A}{u} = (m + 1)$ et $\frac{B}{u} = m$ des valeurs initiales des 2 nombres à leur différence.

Corollaire I. — Si ΔA et ΔB sont de signes contraires, les deux termes $\frac{\Delta A}{A}$ et $-\frac{\Delta B}{B}$ sont de même signe. La valeur absolue de $\frac{\Delta u}{u}$ croît avec m pour mêmes valeurs de $\frac{\Delta A}{A}$ et $\frac{\Delta B}{B}$.

Corollaire II. — Si $\Delta B = 0$ la valeur absolue de $\frac{\Delta u}{u}$ croît encore indéfiniment avec m , elle décroît avec m et est minima pour $m = 0$ ou tend vers une valeur minima pour $\lim m = 0$.

S'il s'agit de réglages à effectuer sur la différence de deux variables physiques A et B , les mots accroissements étant remplacés par les mots erreurs relatives de réglage, les conclusions subsistent.

Application : 1° La puissance de freinage est :

$$(1) \quad W = eI_1$$

$$(2) \quad I_1 = \frac{e - U}{R + r}$$

et par suite on se donne :

$$\frac{e - U}{U} = \frac{1}{m} = m'$$

d'où :

$$e = (m' + 1)U.$$

Ces relations interviendront dans la plupart des schémas, r étant la résistance du rotor et R une résistance éventuelle supplémentaire.

Pour diminuer l'erreur relative de réglage sur I_1 , d'après le corollaire I, on pourra augmenter $u = |e - U|$ soit e .

Mais alors il faut augmenter R car la puissance de freinage W est imposée :

$$\underbrace{W = eI_1}_{\text{puissance de freinage}} = \underbrace{(e - U)I_1}_{\text{puissance dissipée}} + \underbrace{UI_1}_{\text{puissance récupérée}}$$

Le rapport de la puissance dissipée à la puissance récupérée est

$$\frac{1}{m} = m' = \frac{e - U}{U}.$$

En augmentant e on augmente donc la puissance dissipée en chaleur.

Evidemment le réglage le moins délicat consiste à faire $U = 0$ c'est le freinage rhéostatique ou $\lim_{u \rightarrow 0} \frac{U}{u} = 0$ ce qui veut dire e infiniment grand par rapport à u .

Calculons R que l'on peut appeler *résistance stabilisatrice*. Les équations (1) et (2) permettent d'éliminer I_1 d'où :

$$W = \frac{e(e - U)}{R + r}.$$

D'où

$$R = \frac{(1 + m')m'U^2}{W} - r.$$

2° Nous verrons que la tension d'excitation de la dynamo principale s'obtient, pour une même vitesse ω , par la disposition de la tension V entre les bornes des inducteurs, V étant une différence de deux tensions :

$$V = e_a - e_b,$$

La première e_a constante ou croissant avec U croissant, soit avec I_1 décroissant, l'autre e_b approximativement proportionnelle à I_1 . Dans le

cas considéré $\frac{\Delta A}{A}$ et $-\frac{\Delta B}{B}$ sont donc toujours de même signe.

Nous aurons d'après le corollaire I un accroissement relatif de V aussi grand que nous le voudrons en prenant m suffisamment grand.

II. — GENÈSE DES SCHÉMAS MODERNES.

La première idée de disposer l'induit et les inducteurs sous une tension constante ou en dérivation sur le réseau, soit ce qui revient au même les inducteurs sous une tension proportionnelle à la tension du réseau.

Mais, dans les régimes transitoires rapides, la lenteur de l'établissement du flux dans les inducteurs et aussi de la variation éventuelle de ω provoquent des surintensités inacceptables dans l'induit.

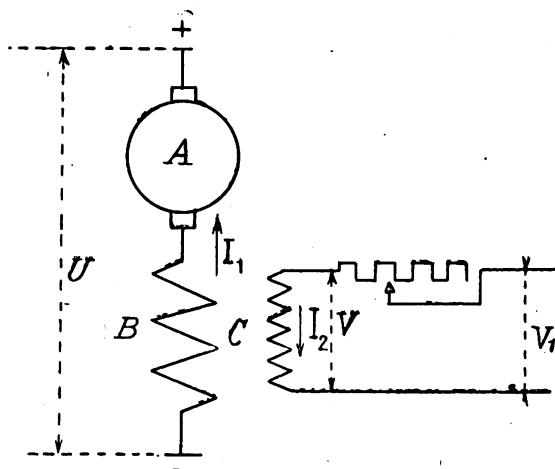


Fig. 1. — Moteur anticompound.

On a donc constaté que les régimes transitoires s'écartent considérablement des régimes réguliers, et on s'est aperçu qu'il fallait tenir compte de la faculté de réglage de la tension U au voisinage des sous-stations, puis du rôle de la chute ohmique en ligne et de la chute inductive.

La traction à courant alternatif monophasé d'ailleurs a bien prouvé que cette self-induction existe pour des variations de courant en ligne pendant une durée de l'ordre d'un dixième de seconde.

Notons en passant que la rapidité de coupure ou d'établissement du courant pris à la ligne par les dynamos de traction jouent un rôle non négligeable.

Il y a intérêt à opérer progressivement en intercalant successivement des résistances. Mais, un disjoncteur peut sauter ou des manœuvres rapides des appareils de démarrage ou de coupure sont à prévoir quoique non recommandables.

On a cherché tout naturellement une solution dans l'anticompoundage (fig. 1).

Mais, si n_1 est le nombre de spires de l'enroulement B traversé par I_1 et n_2 celui de C traversé par le courant I_2 et soumis à la tension V aux bornes, les ampères-tours utiles sont $n_2 I_2 - n_1 I_1$, de sorte que la valeur absolue de la différence nécessite un poids de cuivre élevé correspondant aux ampères-tours $n_2 I_2 + n_1 I_1$.

1° Or, d'après le corollaire II, si nous voulons un accroissement relatif grand, il faut que chacun des deux systèmes d'ampères-tours soit grand par rapport à leur différence.

Il y aurait donc un poids de cuivre et des pertes absurdes sur des moteurs de traction ;

2° Il est intéressant, sinon absolument nécessaire, pour les régimes moteurs de conserver entièrement le moteur série avec ses qualités bien connues :

- a) Robustesse des enroulements inducteurs et encombrement réduit, grâce à la grande section du conducteur ;
- b) Couple indépendant de la tension du réseau ;
- c) Qualité d'auto-régulation du courant ;
- d) Facilité de mise en parallèle des moteurs.

D'ailleurs, il est désirable généralement que les moteurs soient interchangeable avec ceux du réseau et non spécialisés pour les parcours à récupération. Bien entendu, c'est une question à envisager dans chaque cas.

Or, dans un seul enroulement, on peut produire les ampères-tours $n_2 I_2$, en disposant entre ses bornes a et b une tension convenable e_a , puis les ampères-tours $- n_1 I_1$ en les alimentant sous la tension $- e_b$. En disposant entre a et b la tension $e_a - e_b$, on obtient les ampères-tours $n_2 I_2 - n_1 I_1$ avec un poids de cuivre correspondant à la différence algébrique et non pas à la somme des valeurs absolues des deux termes.

Revenant sur la dynamo anticompound à double enroulement (fig. 1), nous devons faire une remarque. Lorsque le courant I_1 varie

rapidement, le courant I_2 varie en sens inverse en jouant un rôle d'amortisseur.

Les courants de Foucault produiront un effet du même genre.

Nous retrouverons ce phénomène d'amortissement chaque fois que nous aurons deux enroulements antagonistes ou des circuits magnétiques non feuilletés.

Mais, dira-t-on, il suffit d'augmenter n_1 pour réduire l'effet amortisseur. Mais alors, régime régulier atteint, les ampères-tours antagonistes seraient trop grands.

Si l'on peut disposer convenablement de la grandeur de e_a et de e_b , on conçoit que le problème est résolu.

Avant de passer aux différents schémas, nous ferons quelques réflexions sur les réalisations de e_a et e_b .

Le courant d'excitation des moteurs est de l'ordre de grandeur du courant I_2 traversant l'induit A, la différence $e_a - e_b$ est petite et de l'ordre des chutes ohmiques des inducteurs B, en régime régulier. *Il est bon qu'elle puisse croître beaucoup en régime transitoire.*

La tension e_a sera généralement obtenue dans une excitatrice, elle-même excitée, soit sous tension constante, une batterie d'accumulateurs par exemple, soit sous une fraction de la tension du réseau obtenue par groupe transformateur à enroulements distincts disposés dans des rotors distincts ou dans les encoches d'un seul rotor à deux collecteurs, soit par égalisatrices, etc... e_a peut aussi être obtenue dans une excitatrice tournant à une vitesse ω_1 proportionnelle à la vitesse ω de l'induit A de la dynamo principale. Il y aura cet avantage que l'excitation I_2 de la dynamo principale croissant avec la vitesse, l'emballement sera automatiquement évité sans intervention du mécanicien.

La tension e_b devant croître avec le courant d'induit I_1 peut être obtenue dans l'induit d'une dynamo auxiliaire dont le circuit magnétique porte un enroulement inducteur parcouru par I_1 . Cette excitatrice peut être elle-même auto-excitatrice.

Elle peut aussi être obtenue par une tension croissant avec I_1 ou une partie de I_1 et développée aux bornes d'une résistance. Cette résistance peut jouer simultanément, le rôle de la résistance R que nous avons appelée stabilisatrice.

On tolère alors des pertes supplémentaires.

La durée d'établissement du courant dans un circuit électrique inductif soumis à une différence de potentiel est toujours diminuée si on augmente la résistance du circuit par une résistance additionnelle, en augmentant bien entendu la différence de potentiel.

En effet, supposons que le courant doive passer de la valeur régulière I_2 à $I_2 + \Delta I_2$ nouvelle valeur régulière.

La résistance supplémentaire permet à la tension de croître aux bornes de la self-inductance pendant le régime transitoire.

Pendant la période transitoire, dans une dérivation, on peut augmenter l'accroissement temporaire du flux dans un enroulement en shuntant cet enroulement par une bobine de self.

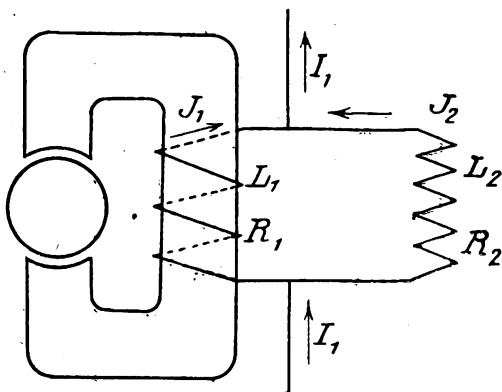


Fig. 2. — Accroissement transitoire du flux d'un inducteur.

La figure 2, représente une excitatrice dont on veut faire croître en régime transitoire le flux avec l'accroissement de courant ΔI_1 . En régime régulier, les courants J_1 et J_2 sont déterminés par les résistances. En régime transitoire, les self-inductances interviennent et, si L_2 est grand vis-à-vis de L_1 , la plus grande partie de la surintensité passera dans L_1 . Régime régulier rétabli, les résistances seules détermineront la répartition des courants. Si le rotor de l'excitatrice développe la tension e_a , celle-ci aura donc une variation renforcée pendant la période transitoire.

L'effet serait encore augmenté en ajoutant une résistance supplémentaire dans la dérivation J_1 .

Nous verrons que des effets du même genre se produisent entre les inducteurs de la dynamo principale et la résistance, lorsque cette résistance parcourue par une fraction de I_1 est chargée de créer la tension e_a totalement ou partiellement. La tension e_a est augmentée temporairement pendant le régime transitoire.

III. — QUELQUES SCHÉMAS PRINCIPAUX.

Nous désignerons toujours par A et B les induits et inducteurs principaux.

a) *Le circuit des inducteurs est indépendant.*

Schéma 1 (fig. 3) (GRATZMULLER). — Nous avons laissé une résistance R en série avec A. Entre les bornes a et b sont intercalés les ro-

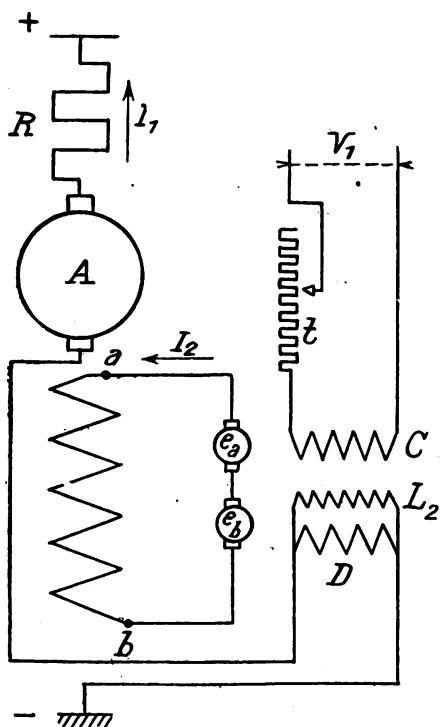


Fig. 3. — Schéma 1 (Gratzmuller).
Circuit d'excitation indépendant.

tors de 2 excitatrices e_a et b_b distinctes dans un circuit entièrement indépendant.

L'une, e_a est excitée sous la tension V_1 , on intercale une résistance réglable et une résistance fixe pour diminuer la période d'établissement transitoire, si V_1 est variable.

Les inducteurs de la deuxième e_b sont traversés par le courant I_1 . On a prévu sur le schéma le shuntage de l'inducteur par une bobine de self L_2 .

Bien entendu e_a est génératrice et e_b fonctionne en moteur.

Les rotors peuvent être entraînés d'une manière quelconque.

Il y a avantage à feuilletter les circuits magnétiques, mesure qui s'impose ailleurs pour toutes les excitatrices à tensions rapidement variables.

Le courant dans les collecteurs est I_2 .

Les enroulements d'excitation étant sur 2 circuits magnétiques distincts ne s'influencent aucunement.

Il semble qu'en conservant aux dynamos la faculté de ne pas se saturer, on pourra disposer d'un procédé très puissant de régulation de I_1 et supprimer R.

Critique. — Mais la puissance de dynamos mise en jeu est :

$$(e_a + e_b)I_2$$

pour obtenir $(e_a - e_b)I_2$.

Si $e_a = (m + 1)(e_a - e_b)$, il faudra installer $(2m + 1)$ fois la puissance d'excitation.

Il y a 2 machines et 2 collecteurs dimensionnés pour surface frottante I_1 .

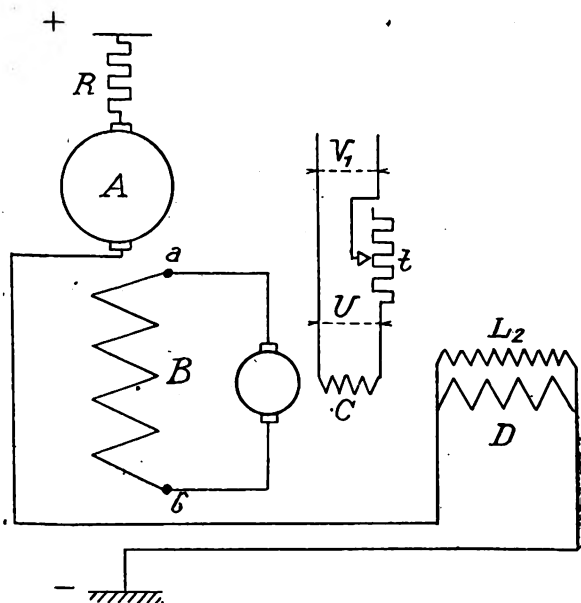


Fig. 4. — Schéma 2 (C. E. F.).
Circuit d'excitation indépendant.

Schéma 2 (fig. 4). — e_a et e_b sont développés dans un même rotor d'excitatrice dont le circuit magnétique est muni d'une excitation

différentielle, au moyen des enroulements C et D excités comme dans le schéma précédent.

L'enroulement C formant amortisseur, il y aura intérêt à ce que la résistance fixe t soit grande.

C'est le schéma de l'English Electric C° et des C. E. F.

Si l'on veut un effet différentiel puissant, les enroulements inducteurs C et D doivent être volumineux.

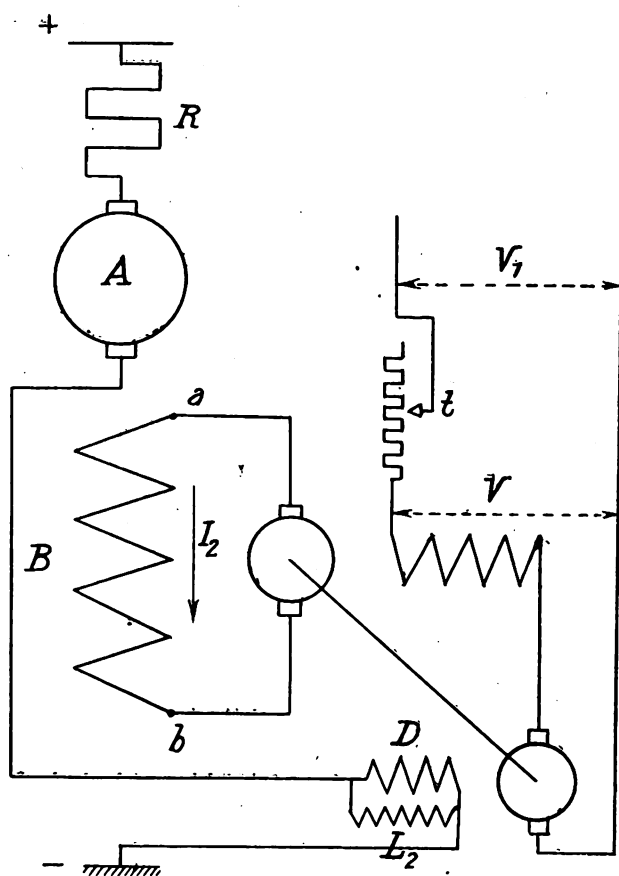


Fig. 5. — Schéma 3 (Gratzmuller).

Schéma 3 (fig. 5) (GRATZMULLER). — Il se rattache aux précédents mais, l'excitatrice unique ne porte qu'un enroulement inducteur excité sous la tension différentielle de V_1 et de l'induit d'une excitatrice excitée elle-même par le courant I_1 , au moyen de l'enroulement D. Une grande résistance est intercalée dans le circuit d'excitation de l'excitatrice principale.

Avantage. — Les inducteurs de l'excitatrice principale ne sont pas volumineux. L'excitatrice est traversée par le courant I_2 .

Il n'y a pas d'enroulement amortisseur. Le moyen de régulation est puissant. Il semble que la résistance B peut être supprimée.

Critique. — Il y a une petite excitatrice d'excitatrice mais son collecteur est tout petit.

b) Le circuit des inducteurs est traversé par le courant I_1 de l'induit principal.

La f. é. m. e_b est due, totalement ou partiellement, à la chute ohmique d'une résistance traversée par une partie du courant I_1 .

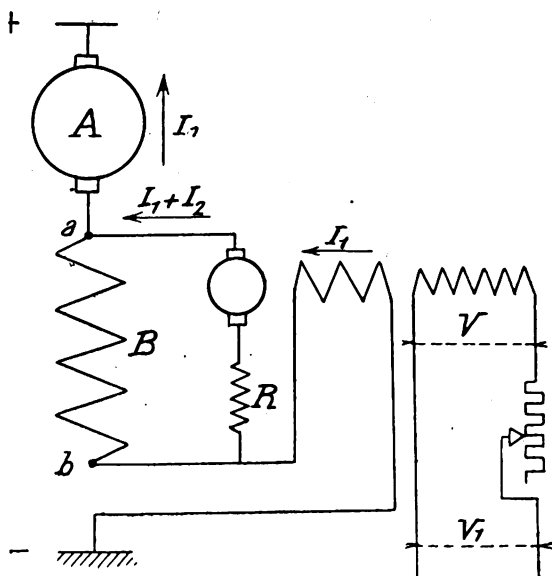


Fig. 6. — Schéma 4.

Schéma 4 (fig. 6). — L'induit A reste connecté avec les inducteurs B comme pour la marche en moteur série. Une excitatrice entraînée séparément a son induit intercalé entre les bornes a et b de l'inducteur B .

Elle est traversée par le courant $I_1 + I_2$ de l'ordre de grandeur de $2I_1$. Elle est excitée en anticompound comme dans le schéma 2.

Une résistance R peut être intercalée dans le circuit de l'excitatrice.

En régime régulier, la répartition du courant I_1 dans les 2 dériva-
tions, inducteurs B ou excitatrice, est déterminée par les résistances des
2 dériva-
tions et la f. é. m. de l'excitatrice.

En régime transitoire, la majeure partie de la surintensité ΔI_1 passe par l'excitatrice dont la self-inductance est inférieure à celle de B. La résistance R joue le rôle de résistance stabilisatrice. La chute ohmique dans la dérivation augmente la tension aux bornes des inducteurs.

L'enroulement anticompound peut par suite être supprimé en augmentant R .

Résistance R et enroulement anticompound développent des tensions qui s'ajoutent pour produire e . Régime régulier établi, la plus grande partie de I_1 passe par l'inducteur B. On voit que ce schéma procède des précédents et s'inspire aussi de la dynamo anticompound à double enroulement de la figure 1.

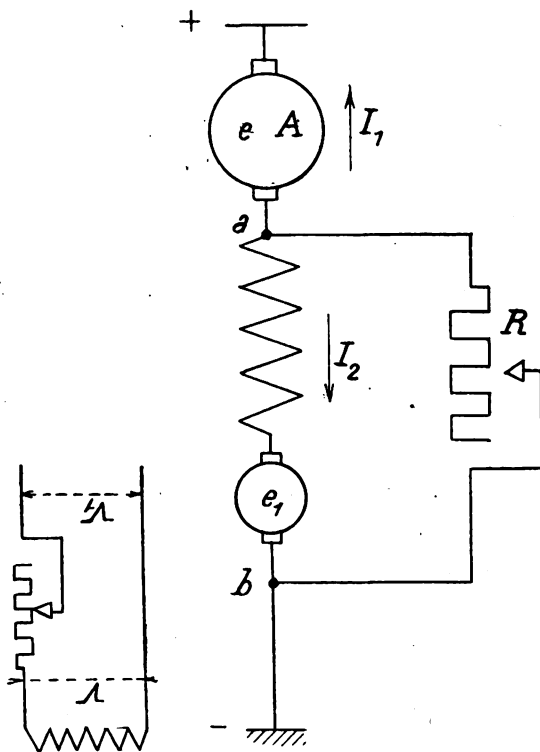


Fig. 7. — Schéma 5 (Westinghouse).

La f. é. m. e de A est égale, aux chutes ohmiques près, à U .

Schémas 5 (fig. 7). — La résistance R est seule dans une dérivation. L'excitatrice est dans la branche B. La tension U , aux chutes ohmiques près, est égale à la différence des f. é. m. e de A et e_1 de l'excitatrice.

R joue à la fois le rôle de résistance stabilisatrice et sert à créer la tension e_a .

Le courant dans le collecteur de l'excitatrice est I_2 .
 e doit être majoré de e_1 .

Schéma 6 (fig. 8). — C'est le même que le précédent, mais l'excitatrice porte un enroulement anticompound traversé par le courant I_1 .

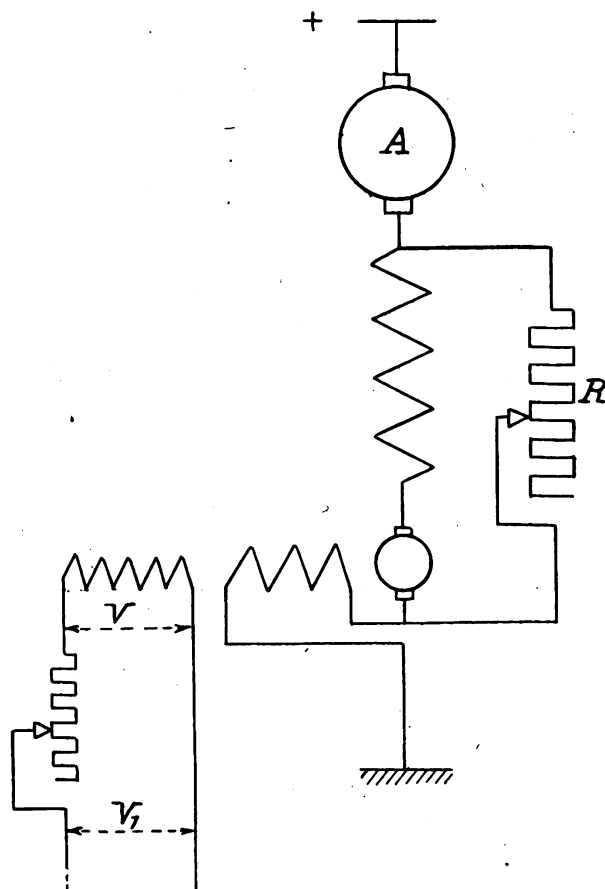


Fig. 8. — Schéma 6 (Westinghouse).

On voit que ces 2 derniers schémas et surtout le dernier doivent tolérer une perte appréciable dans les résistances. Il est évident que si on augmente R , on augmente la stabilité en augmentant les pertes il est vrai.

Les schémas 3, 4 et 5, permettent en fermant le circuit de l'excitatrice et excitant progressivement l'enroulement sous tension V de l'excitatrice de passer progressivement de la marche motrice à la marche de freinage.

Schéma 7 (fig. 9). — On peut utiliser un moteur comme excitatrice. Bien entendu alors l'excitatrice est à excitation série. C'est ce que réalise le schéma 7 (fig. 9). Naturellement il est avantageux qu'il y ait un

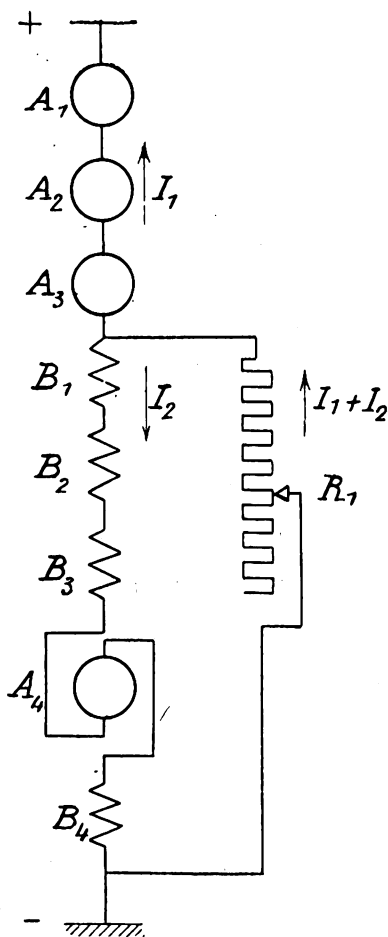


Fig. 9. — Schéma 7.
Excitation par une dynamo principale.

assez grand nombre de moteurs à tension relativement faible par collecteur et surtout que l'on puisse jouer sur le nombre de rotors à mettre en série.

Le schéma 8 de la figure 10 est une variante qui permet de régler séparément le courant dans l'inducteur B_4 de l'excitatrice et le courant I_2 dans les inducteurs B des autres génératrices.

Ce schéma, s'il n'y a pas un grand nombre de moteurs relativement

basse tension, doit tolérer des pertes Joule élevées dans les résistances. Mais, il ne nécessite pas d'excitatrice supplémentaire.

La puissance de freinage de la génératrice principale excitatrice est très réduite. Mais cela n'a aucune importance s'il y a un grand nombre de moteurs.

On voit que, lors d'un régime transitoire rapide, la surintensité ΔI_1 passera principalement dans les résistances de m en n .

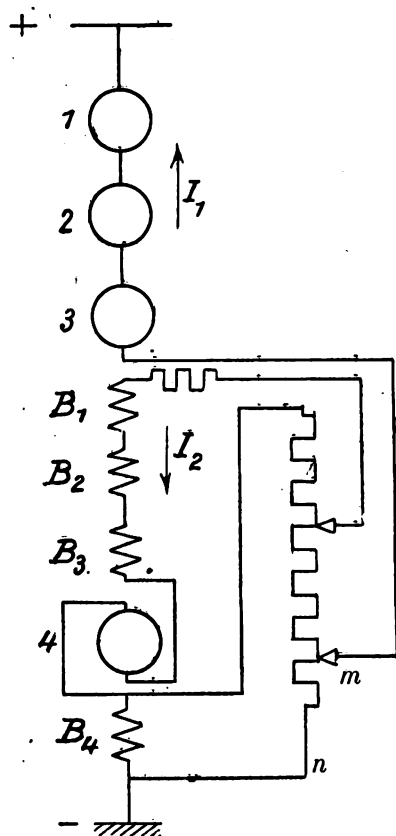


Fig. 10. — Schéma 8.
Variante du dispositif de la figure 9.

Puis, en arrivant vers le régime régulier, une partie du courant prendra les autres dérivations, les f. é. m. de self disparaissant progressivement à mesure que l'on approche du régime régulier, la tension aux bornes de B_4 devient progressivement une différence de 2 chutes ohmiques. Elle diminue donc. La Société Oerlikon a fait quelque chose du même genre en intercalant au schéma 6. de la figure 8, une résis-

tance stabilisatrice supplémentaire entre l'induit A et le pôle négatif de la ligne.

On conçoit qu'il y ait là un procédé de réglage supplémentaire du régime régulier.

Schéma 9 (fig. 11). — Il n'y a, bien entendu, aucune difficulté à mettre des inducts en série. Il faut prendre des précautions pour les

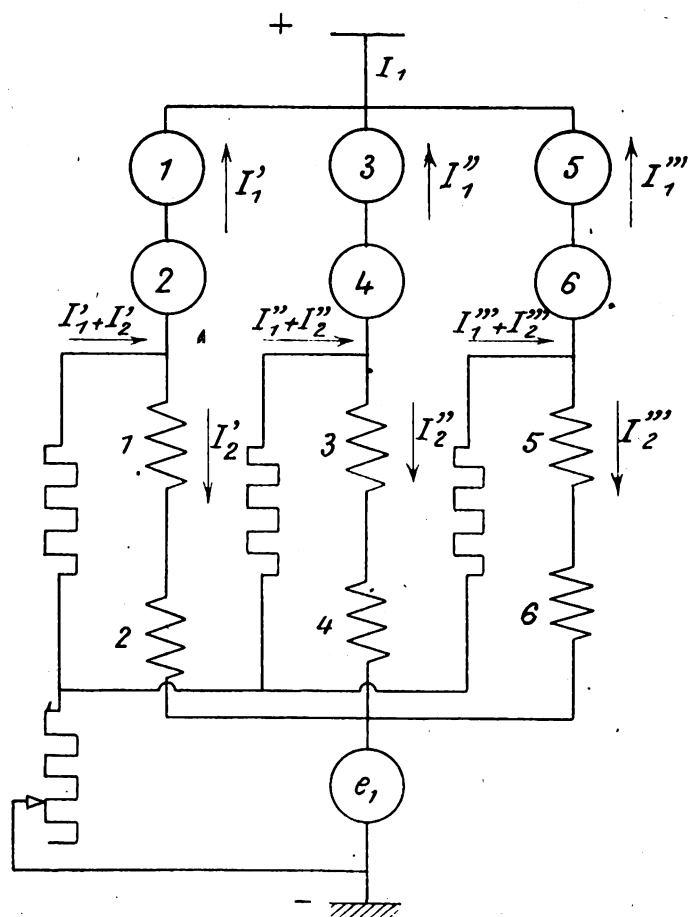


Fig. 11. — Schéma 9.
Exemple de plusieurs dérivations d'induit en parallèle.

mettre en parallèle pour que les charges se répartissent à peu près également.

Le principe consiste à faire des dérivations absolument distinctes, ayant leurs dispositifs de régulation distincts.

L'emploi de résistances intervenant dans la production de e_a , totalement ou partiellement, permet aussi de résoudre le problème avec une seule excitatrice.

Le schéma 9, figure 11 en est un exemple.

IV. — CONCLUSIONS.

On peut évidemment imaginer beaucoup d'autres solutions, en particulier des régulateurs sensibles.

Mais la qualité d'un matériel de traction est avant tout dans sa robustesse et sa simplicité. Il faut prohiber toute solution délicate.

Les solutions où la tension de chute ohmique intervient pour le réglage de l'excitation, solution développée à l'origine, je crois, principalement par la Société Westinghouse, tolère des pertes supplémentaires mais procure simultanément une résistance stabilisatrice et une surexcitation de réglage dans le régime transitoire.

Une solution dans le genre de celle des C. E. F. ou de celle que j'ai exposée schéma 3 (fig. 5), peut-elle permettre de supprimer toute résistance stabilisatrice ? Cela semble probable. Pourtant, en exagérant la sensibilité du système, ne risque-t-on pas de produire des oscillations de courant ?

Le réglage le plus facile du freinage est incontestablement le freinage sur résistances.

D'abord, avons-nous le droit de gaspiller de l'énergie ?

Ensuite, la chaleur à dissiper ne créera-t-elle pas d'autres complications.

Enfin, l'emploi des convertisseurs à mercure, avec leur rendement élevé, est-il de nature à combattre l'intérêt économique de la récupération ?

Il est, je crois, bien difficile de trancher pour oui ou non.

J'aimerais qu'un vœu fut émis, ou une demande adressée aux réseaux de traction, pour que des relevés fussent faits *par oscillographes*, permettant d'avoir des notions des limites de variations de tension U sur les réseaux de traction et sur les dérivées $\frac{dU}{dt}$ de cette tension par rapport au temps, ce qui justifierait peut-être la création d'un appareil spécial de mesure.

Les sociétés de transports à arrêts fréquents, tramways et chemins de fer de banlieue pourraient être sollicités, pour le freinage sur pente

les Compagnies du Midi ou du P. L. M. seront probablement favorables. La Compagnie du Midi a d'ailleurs des trains à récupération en service.

Il serait aussi intéressant que les constructeurs publient les résultats de mesures mettant en évidence l'importance du rôle des courants de Foucault dans l'établissement du flux des inducteurs, ou du flux des rotors des dynamos principales de traction.

Une théorie mathématique pourrait alors avec quelque chance de succès être essayée pour représenter les phénomènes en régime transitoire; j'ai l'intention de tenter quelques calculs et de les présenter en octobre.

LES ALLIAGES A HAUTE PERMÉABILITÉ (1)

par M. CHAUCHAT

Ingénieur conseil à la Société Hewittie.

Généralités. — Difficulté d'emploi des métaux magnétiques ordinaires dans les transformateurs téléphoniques. — Quelques définitions. — Alliages ferro-magnétiques à haute perméabilité. — Classification et propriétés des alliages fer-nickel. — Fabrication des alliages au nickel. — Usages : câbles sous-marins, transformateurs d'intensité, relais ultrarapides, appareils de mesure, transformateurs téléphoniques : exemples de calculs.

Certains appareils, tels que les transformateurs téléphoniques, travaillent dans des conditions particulièrement désavantageuses, qui nécessitent l'emploi de matériaux magnétiques plus délicats et plus sensibles que les aciers doux ou au silicium.

Les alliages fer-nickel ont été spécialement étudiés pour répondre à ces desiderata. Ils présentent des propriétés magnétiques extrêmement intéressantes, qui sont absolument nécessaires dans certaines applications, dont les principales sont : la construction de câbles sous-marins à fort coefficient de self-inductance et la constitution de transformateurs téléphoniques.

GÉNÉRALITÉS

De tous temps le fer et ses alliages ont été employés dans les circuits magnétiques d'appareils électromagnétiques comme étant les meilleurs conducteurs connus du flux magnétique.

Au début, l'acier doux fut utilisé dans tous les circuits magnétiques, mais les pertes par hystérésis et par courants de Foucault étant trop importantes, il fut plus tard remplacé par un alliage de fer et de silicium (2 à 4 pour cent de silicium) appelé l'acier au silicium. Cet acier présente un coefficient hystérétique nettement plus faible que celui de l'acier doux et une résistivité très nettement supérieure (40 à 60 microhms cm/cm²).

(1) Cette communication sera discutée à la semaine d'Octobre le Vendredi 25 Octobre 1929.

Quand apparurent les lampes triodes en T.S.F., il fut nécessaire d'utiliser des transformateurs pour coupler une lampe à la suivante ; tout naturellement, on employa la tôle au silicium dans les circuits magnétiques des transformateurs basse fréquence ; comme ceux-ci étaient strictement utilisés en télégraphie, les premiers transformateurs réalisés furent parfaits, étant donné les fréquences musicales à amplifier.

A l'apparition de la radio-téléphonie, les mêmes appareils de réception furent utilisés ; les auditions n'avaient rien de parfait, mais comme, d'autre part, les stations d'émissions ne réalisaient pas non plus l'idéal, on se contenta de cet à peu près

Peu à peu, l'émission se perfectionne et on cherche à émettre avec le même rendement, aussi bien les fréquences les plus basses que les plus hautes ; une recherche corrélatrice se fait dans les appareils de réception, et une étude un peu poussée démontre que le principal défaut réside dans les transformateurs de couplage ; ils ne sont pas calculés et le rendement est loin d'être le même dans toute l'étendue du registre musical.

La cause de ce manque d'uniformité dans le rendement doit être recherchée principalement dans la trop faible valeur du coefficient de self-inductance de l'enroulement primaire, se traduisant par une impédance trop faible aux basses fréquences, et ainsi par un transfert d'énergie insuffisant de la lampe triode au transformateur.

DIFFICULTÉ D'EMPLOI DES MÉTAUX MAGNÉTIQUES ORDINAIRES DANS LES TRANSFORMATEURS TÉLÉPHONIQUES

Comme nous venons de le montrer, de tels transformateurs réalisés, faute d'un métal plus sensible, avec de l'acier au silicium, n'ont pu satisfaire les plus exigeants au point de vue musical. Lorsque l'on examine de plus près les conditions dans lesquelles fonctionne un transformateur téléphonique, on se trouve en présence des deux faits suivants :

1° faible amplitude alternative.

2° superposition d'un courant continu.

Voyons quels sont les effets nuisibles de ces deux facteurs.

1° *Faible amplitude alternative.* — Si l'on examine la courbe d'aimantation de l'acier au silicium, on constate que dans les régions des champs faibles, l'induction varie peu et la perméabilité est faible (de 250 à 350), (voir courbes fig. 1).

2° *Superposition d'un courant continu.* — La superposition d'un courant continu a non seulement pour effet de faire travailler le circuit magnétique dans des régions plus ou moins horizontales de la courbe d'aimantation, mais en outre, la force magnétomotrice alternative appliquée fait décrire au fer un petit cycle d'hystérésis, dont la ligne

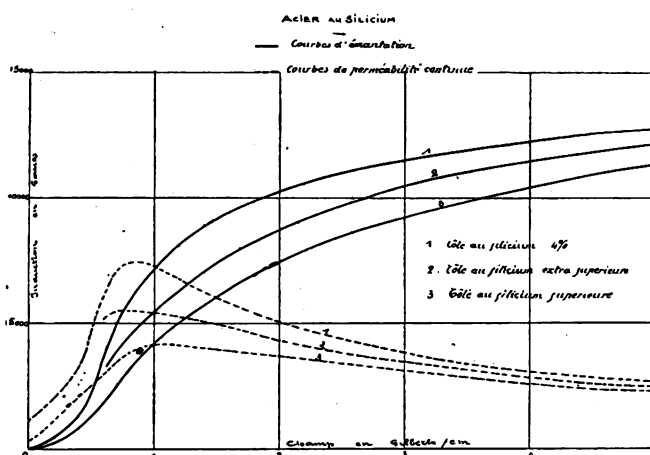


Fig. 1.

des sommets ne se superpose pas à la courbe d'aimantation mais s'abaisse à tel point que la perméabilité alternative, qui est représentée par :

$$\mu_{alt} = \frac{\Delta B}{\Delta H},$$

est bien inférieure à la perméabilité statique en ce point. D'autre part, la perméabilité alternative décroît au fur et à mesure que la force magnétomotrice alternative diminue et atteint un minimum pour chaque point de la courbe d'aimantation.

RAPPEL DE QUELQUES DÉFINITIONS

Nous rappelons ci-dessous quelques définitions des différentes perméabilités que l'on peut avoir à considérer dans l'étude d'un circuit magnétique.

1° *Perméabilité continue ou perméabilité statique.* — C'est le rapport entre l'induction dans le fer et la valeur du champ.

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (1)$$

2° *Perméabilité initiale continue*. — C'est la valeur que prend la perméabilité continue lorsque le champ devient de plus en plus petit. C'est en somme la valeur de la perméabilité à l'origine.

3° *Perméabilité alternative ou perméabilité dynamique* (appelée en anglais « incremental permeability »). — C'est le rapport de la variation d'induction à la variation corrélative du champ

$$\mu_{alt} = \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (2)$$

4° *Perméabilité initiale alternative* (appelée en anglais « reversible permeability »). — C'est le minimum vers lequel tend la perméabilité alternative lorsque la variation de champ devient de plus en plus faible.

5° *Perméabilité alternative apparente*. — Cette perméabilité est intéressante à connaître dans le cas où le circuit magnétique présente un entrefer. — Si nous appelons :

l_1 la longueur du fer ;

l_2 la longueur de l'entrefer ;

μ_{alt} la valeur de la perméabilité alternative, la perméabilité apparente est représentée par :

$$\mu_{app} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_{alt}} + \frac{l_2}{l_1}}. \quad (3)$$

ALLIAGES FERRO-MAGNÉTIQUES À HAUTE PERMÉABILITÉ

Généralités.

L'influence de la proportion et de la nature du métal ou du métal-loïde allié au fer sur les qualités magnétiques d'un ferro alliage est assez complexe ; il existe toutefois un certain nombre de faits connus que nous rappelons ci-dessous.

Le manganèse est le métal le plus néfaste quant à son influence sur les propriétés magnétiques du fer et il conviendra de l'éliminer soigneusement de tout alliage magnétique.

Le chrome, le molybdène, le tungstène et le cobalt ont une tendance à diminuer la perméabilité, mais par contre augmentent le champ coercitif dans de très fortes proportions ; ces alliages seront donc tout désignés pour la fabrication des aimants permanents.

Le silicium et l'aluminium provoquent, en même temps qu'une

diminution des pertes par hystérésis, une augmentation de la résistivité et par suite une diminution des pertes par courants de Foucault.

Le carbone, par contre, augmente très nettement les pertes par hystérésis en même temps qu'il diminue notablement la perméabilité.

Au point de vue micrographique, un alliage de fer se présente toujours sous la forme de grains de fer pur (ferrite) engagés dans un aimant lui-même composé de lamelles entrelacées de ferrite et de cémentite (Fe_3C). Le ciment est en proportion d'autant plus grande que la teneur en carbone est plus élevée; pour des aciers doux, au contraire, le métal est presque exclusivement composé de ferrite. Dans le cas où l'alliage contient d'autres éléments que le carbone, certains, tels que le nickel, l'aluminium et le silicium se fixent sur le ferrite sous forme de solution solide, d'autres, tels que le chrome, le tungstène et le soufre, se fixent au contraire dans la perlite. Les éléments qui se fixent sur la perlite ont une influence sur le champ coercitif; par contre, ceux qui se fixent sur la ferrite ont une influence favorable sur la perméabilité et l'hystérésis.

De tous les éléments que l'on peut allier au fer il en est un particulièrement intéressant, qui est du reste magnétique lui-même et dont les alliages avec le fer ont été spécialement étudiés dans les laboratoires de la Western Electric Co. et de l'American Telephone and telegraph Co., c'est le nickel.

Si l'on fait varier la teneur en nickel d'un alliage fer-nickel, on constate que la perméabilité initiale continue varie suivant une courbe présentant deux régions extrêmement intéressantes, qui sont : celle voisine de 78,5 pour cent de nickel et celle comprise entre 40 et 60 pour cent de nickel.

CLASSIFICATION ET PROPRIETES DES ALLIAGES FER-NICKEL

Les deux régions précédemment indiquées correspondent à deux grandes catégories d'alliages :

Première catégorie. — Teneur en nickel voisine de 78,5 pour cent. — Ces alliages sont du type du Permalloy « A » de la Western Electric et du Mumétal. — Ils présentent une perméabilité initiale très élevée variant de 8 à 12 000 et une perméabilité continue maximum de 60 à 80 000 pour un champ de 0,05 gilbert par cm. Ils sont presque saturés dans le champ terrestre (0,2 gauss).

Induction maximum 10 500 gauss.

Résistivité 17 microhms cm/cm².

Ces alliages ont, d'autre part, des pertes par hystérésis extrême-

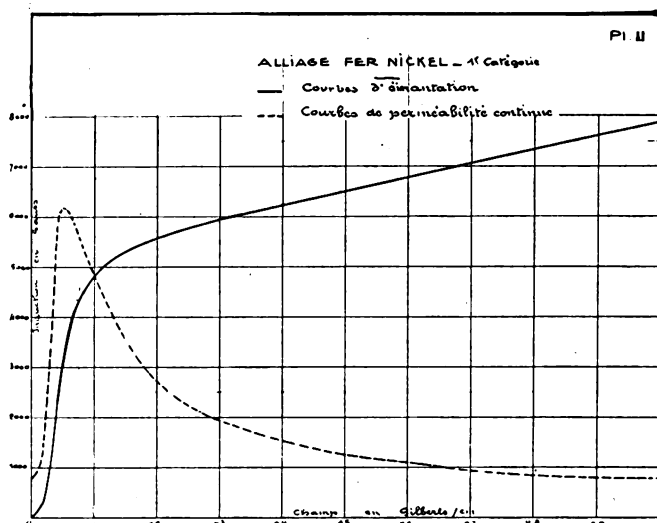


Fig. 3.

ment réduites, 10 à 12 fois plus faibles que celles du meilleur acier au silicium.

Soit par cycle et par cm³, à 5 000 gauss, 70 ergs.

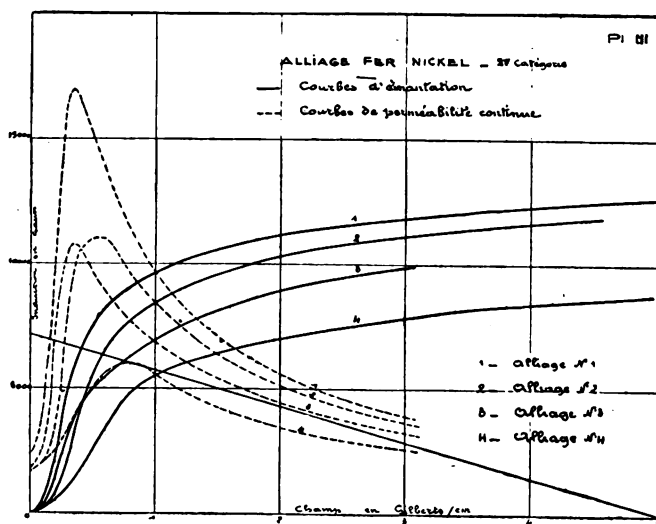


Fig. 3.

Deuxième catégorie. — Teneur en nickel comprise entre 40 et 60 pour

cent. — Ces alliages sont du type Métal « A » et Permalloy « B », ainsi que d'autres alliages similaires, tels que le Radio-métal et le Permax.

Les perméabilités initiales de ces différents alliages sont comprises entre 1 000 et 2 500 et les perméabilités continues maxima de l'ordre de 11 à 16 000 pour des champs respectifs d'environ 0,5 à 0,35 gilbert/cm.

Induction maximum 14 à 16 000 gauss.

Résistivité 45 à 50 microhms cm/cm².

Pertes hystérétiques : 2 fois 1/2 plus faibles que celles du meilleur acier au silicium, soit par cycle et par cm³ à 5 000 gauss... 300 ergs.

Nous rappelons, pour servir de comparaison, les propriétés des aciers doux et des aciers au silicium.

a) *Acier doux, tôle ordinaire :*

Perméabilité initiale 250.

Perméabilité maximum 5 000 pour un champ d'environ
1,2 gilbert/cm.

Induction maximum 22 000 gauss.

Résistivité 10 à 15 microhms cm/cm².

Pertes hystérétiques par cycle et par
cm³ à 5 000 gauss 1 800 ergs.

b) *Acier au silicium, tôle supérieure 2 pour cent de silicium.*

Perméabilité initiale 300.

Perméabilité maximum 5 000 pour un champ d'environ
1 gilbert/cm.

Induction maximum 21 000 gauss.

Résistivité 40 microhms cm/cm².

Pertes hystérétiques par cycle et par
cm³ à 5 000 gauss 850 ergs.

c) *Acier au silicium tôle extra supérieure (3,5 pour cent de silicium).*

Perméabilité initiale 350.

Perméabilité maximum 6 000 pour un champ d'environ
0,75 gilbert/cm.

Induction maximum 20 000 gauss.

Résistivité 60 microhms cm/cm².

Pertes hystérétiques par cycle et par
cm³ à 5 000 gauss 750 ergs.

FABRICATION DES ALLIAGES AU NICKEL.

Tous ces alliages fer-nickel sont obtenus d'une façon analogue. Les éléments entrant dans la composition de l'alliage doivent être de pre-

mière qualité (fer de Suède et nickel électrolytique pur). La fusion de ces métaux est opérée dans un creuset de silice placé dans un four électrique à haute fréquence du type Northrup et toutes les précautions sont prises afin d'éliminer soigneusement toutes causes susceptibles d'apporter dans l'alliage du carbone, du soufre ou de l'oxygène.

L'alliage ainsi obtenu est laminé en bandes de différentes dimensions et peut être découpé suivant un profit quelconque.

Recuit. — Le recuit des alliages fer-nickel est de la plus haute importance et un alliage non recuit peut ne présenter qu'une perméabilité de l'ordre de 5 à 15 pour cent de la valeur de celle du même alliage convenablement recuit.

Ce recuit, malgré qu'il doive varier suivant la composition de l'alliage, doit être conduit sensiblement de la même façon. Naturellement, tout travail mécanique doit être terminé avant le recuit, et l'alliage doit être débarrassé de toute impureté (en particulier d'huile) susceptible d'apporter du carbone, du soufre etc...

Le recuit lui-même doit s'exécuter dans les meilleures conditions en absence de carbone, de soufre et d'oxygène. A cet effet, on utilise des creusets à double couvercle, dont l'espace entre les deux couvercles est rempli d'une matière filtrante, telle que la limaille de fer.

La température minimum à atteindre est de l'ordre de 900° C, la température maximum étant de 955°. Cette température de recuit doit être maintenue pendant au moins deux heures afin d'atteindre l'équilibre interne. Le refroidissement doit être extrêmement lent (particulièrement au passage des températures de 900 à 300° C) et il ne doit pas durer moins de huit heures.

Il est bon, quelquefois, de recuire à nouveau jusqu'à 600° C et de laisser refroidir lentement. Il est à noter que des recuits successifs et répétés ne peuvent en aucun cas altérer les alliages fer-nickel, mais qu'au contraire ils améliorent les propriétés magnétiques.

USAGES

Les usages de ces alliages sont multiples et nous ne citerons que quelques-unes des grandes applications :

1° *Câbles sous-marins.*

Les métaux à haute perméabilité permettent d'augmenter le coefficient de self-inductance des câbles dans de très fortes proportions.

Le métal, sous forme d'un ruban dont les dimensions sont : épaisseur 0,156 mm et largeur 3,25 mm, est enroulé sur toute la longueur du fil de cuivre, juste sous la couche de gutta-percha : sa présence permet d'augmenter l'induction autour du cuivre dans la proportion de 1 à 2 000.

Un câble de ce type a été installé entre New-York et les îles Açores sur une longueur de 4 000 km et a permis des transmissions atteignant 1 700 mots à la minute, multipliant ainsi par 4 la capacité de trafic.

Pour un tel usage, naturellement, seuls le Permalloy « A » ou le Mumétal sont à utiliser.

2° Transformateurs d'intensité.

3° Relais ultra-rapides.

Du fait des faibles pertes hystérétiques, les alliages fer-nickel sont intéressants à employer dans les applications ci-dessus.

4° Appareils de mesure.

Les appareils à fer doux mobile utilisant ces alliages peuvent être employés avec précision indifféremment pour des mesures en courant continu ou en courant alternatif.

5° Transformateurs téléphoniques.

Cette application, qui est, avec celle du câble sous-marin de beaucoup la plus importante, nécessite une étude spéciale.

Un transformateur téléphonique servant d'organe de couplage entre deux étages d'amplification à lampe triode, doit pouvoir transmettre toutes les fréquences du registre musical. Pour la reproduction uniforme des basses fréquences, il faut que l'impédance du primaire à ces fréquences soit élevée, c'est à-dire que le coefficient de self-inductance du primaire soit lui-même important. On ne peut augmenter exagérément le coefficient de self-inductance en augmentant simplement le nombre de spires primaires, car cela conduirait, soit à augmenter l'enroulement secondaire, au delà des limites possibles de capacité secondaire, d'encombrement et de prix, pour conserver un rapport de transformation donné acceptable (4 à 5), soit à se contenter d'un faible rapport de transformation (2 à 2,5), se traduisant par une amplification par étage insuffisante.

On est ainsi conduit à constituer le circuit magnétique avec un métal

plus susceptible et plus perméable que l'acier au silicium, et les alliages fer-nickel ont été étudiés dans ce but.

Il y a lieu toutefois d'utiliser de tels alliages avec discernement; ceux de la première catégorie, par exemple, pourraient, étant mal employés, arriver à se saturer trop rapidement. En fait, les alliages de la deuxième catégorie conviennent beaucoup mieux pour cet usage, quoique théoriquement, dans des conditions déterminées de force magnétomotrice continue et de force magnétomotrice alternative, pour obtenir la perméabilité apparente maximum, il faudrait prendre un alliage différent dans chaque cas.

EXEMPLES DE CALCULS

Nous allons traiter ci-après quelques exemples de calculs, afin de montrer comment se pose et se résout le problème délicat de la recherche de la perméabilité apparente maximum dans les circuits magnétiques parcourus par un flux continu, et soumis à des forces magnétomotrices alternatives faibles.

Considérons un circuit magnétique sans entrefer et muni d'un enroulement.

Si l représente la longueur du circuit magnétique en cm,

S représente la section réelle du fer en cm^2 ,

N représente le nombre de spires de l'enroulement.

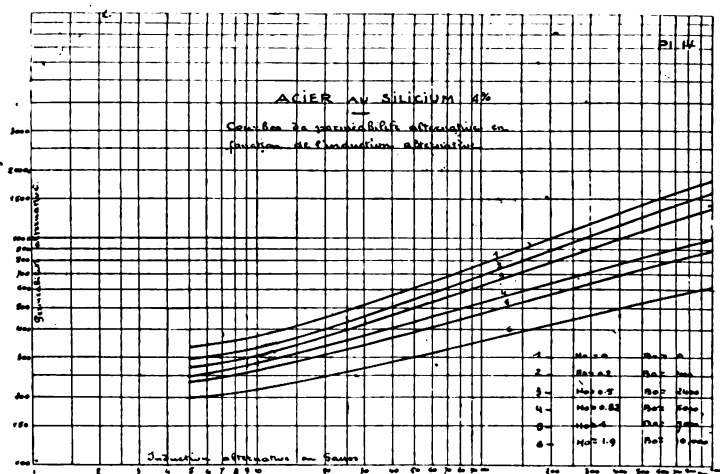


Fig. 4.

Le coefficient de self de cet ensemble est représenté par :

$$L = \frac{1,256 N^2 \mu_{app} S}{l} 10^{-8} \text{ en henry}$$

Les facteurs L , S et N sont connus et dépendent des dimensions géométriques du circuit magnétique et de l'enroulement.

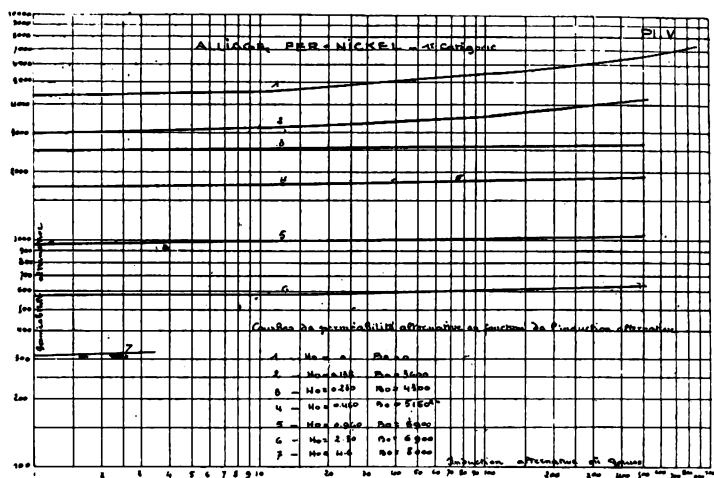


Fig. 5.

Seule la perméabilité n'est pas bien déterminée et sa valeur dépend, comme nous l'avons déjà montré, des valeurs des f.é.m continues et alternatives.

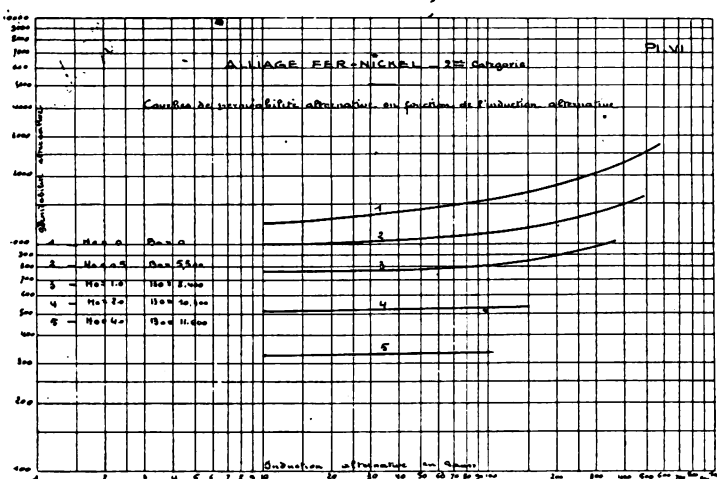


Fig. 6.

Dans le cas actuel d'un circuit magnétique sans entrefer, la perméabilité apparente se réduit à la perméabilité alternative.

Des séries de mesures faites sur différents échantillons de métaux et

d'alliages, ont permis de tracer les courbes de la perméabilité alternative en fonction de l'induction alternative pour plusieurs valeurs du champ continu superposé. (Voir fig. 4, 5 et 6).

Considérons maintenant le même circuit magnétique que précédemment, mais coupé par un entrefer de longueur l_2 et soit l_1 la longueur du fer.

Le coefficient de self-inductance est toujours donné par la même formule (1), mais il faut définir la perméabilité apparente dans ce cas.

D'autre part, un calcul facile montrerait que la perméabilité apparente est représentée par la formule suivante :

$$\mu_{app} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_{alt}} + \frac{l_2}{l_1}} \quad (3)$$

(en supposant l_2 négligeable devant l_1).

Expérimentalement ont été déterminées, pour chaque alliage, des séries de courbes donnant la perméabilité alternative en fonction de l'induction alternative (voir fig. 4, 5, et 6) pour différentes valeurs de l'induction continue.

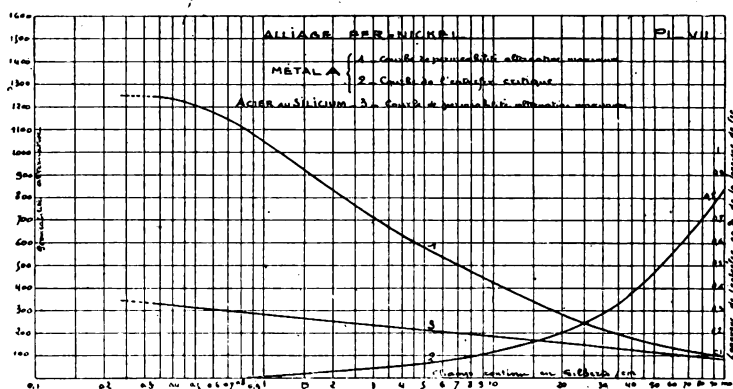


Fig. 7.

Si nous reprenons la formule (3) nous constatons que le dénominateur comporte deux termes dépendant tous deux d'une même quantité (l_2) et qui varient en sens inverse avec cette quantité, il s'ensuit que la perméabilité passera par un maximum pour une certaine valeur de l'entrefer.

Au moyen de la courbe d'aimantation, et en traçant, pour un même point de la courbe, une série de droites représentant chacune un entrefer différent, en répétant cette construction pour plusieurs points de la

courbe, et en récapitulant les résultats sur un tableau, il est possible de tracer, en fonction du champ continu, les courbes de l'entrefer critique permettant d'obtenir la perméabilité apparente maximum, et de ces perméabilités apparentes maxima (Voir fig. 7 ces courbes pour le Métal « A »).

Avec cette courbe d'entrefer et celles de perméabilité alternative, nous avons en mains tous les éléments permettant d'entreprendre n'importe quel calcul de transformateur ou de self-inductance parcourus ou non par un courant continu.

Nous présentons ci-dessous deux exemples typiques de calcul de transformateurs basse fréquence.

Exemple n° 1.

Soit à calculer la réactance à la fréquence 50 p : s d'un transformateur téléphonique dont le primaire comportant 4 500 spires est inséré dans le circuit plaque d'une lampe triode ayant un courant permanent de $I = 2 \text{ mA}$ et une résistance interne $R_p = 8\,000 \text{ ohms}$.

Circuit magnétique en Métal « A » ;

Section de ce circuit $S = 3,62 \text{ cm}^2$;

Longueur de ce circuit $l = 12,7 \text{ cm}$.

Force magnétomotrice continue $= 1,25 \text{ NI} = 11,25 \text{ Gilb}$.

$$\text{Champ continu} = \frac{11,25}{l} = 0,89 \text{ Gilb/cm.}$$

En nous reportant à la fig. 7, nous constatons que l'entrefer est infime, nous assemblerons donc notre circuit magnétique à tôles jointives.

Si nous nous reportons à la fig. 6, nous obtenons la perméabilité alternative pour des faibles valeurs de l'induction alternative (10 gauss par exemple), en interpolant entre les courbes $H_0 = 0,5$ et $H_0 = 1$.

La valeur trouvée est 820.

Portons maintenant cette valeur de μ_{alt} dans l'équation (1) et nous avons :

$$L = \frac{1,256 \times 4\,500^2 \times 820 \times 3,62}{12,7} \times 10^{-8} = 59,5 \text{ henrys.}$$

A 50 p : s la réactance a pour valeur

$$L = 59,5 \times 314 = 18\,500 \text{ ohms.}$$

Comme la lampe à laquelle le transformateur est couplé a une résis-

tance plaque de 8 000 ohms, le rapport $\frac{L}{R_p}$ aura pour valeur :

$$\frac{18\,500}{8\,000} = 2,3$$

c'est-à-dire que la tension alternative aux bornes du primaire sera de l'ordre de 91 pour cent de la tension totale développée par la lampe, c'est-à-dire qu'à cette fréquence notre transformateur aura un excellent rendement.

Traitions maintenant le même problème en utilisant de l'acier au silicium.

Sur les courbes de la fig. 4 nous trouvons que la perméabilité alternative pour $H_0 = 0,89$ et pour une induction alternative de 10 gauss, a une valeur de 270.

L devient égal à 18,7 henrys et la réactance à 50 p : s devient 5 850 ohms;

soit un rapport : $\frac{L}{R_p} = 0,73$ et un rapport des tensions, égal à 59 pour cent.

Exemple n° 2.

Soit à calculer la réactance à la fréquence 50 p : s d'un transformateur téléphonique dont le primaire, comportant 4 000 spires, est inséré dans le circuit plaque d'une lampe triode ayant un courant permanent de $I = 15$ mA et une résistance plaque $R_p = 2\,000$ ohms.

Circuit magnétique en Métal « A » ;

Section de ce circuit $S = 5$ cm² ;

Longueur de ce circuit $l = 15$ cm.

Force magnétomotrice continue $= 1,25NI = 75$ gilberts.

Champ continu $\frac{75}{l} = \frac{75}{15} = 5$ gilberts/cm.

Sur la figure 7 nous trouvons la longueur de l'entrefer $l_2 = 0,07$ pour cent l_1 , soit $l_2 = 0,0105$ cm.

Sur la courbe d'aimantation du métal « A » (Alliage n° 2, fig. 3), traçons la droite

$$H_1 l_1 + B_0 l_2$$

elle a pour ordonnée à l'origine : $H = \frac{f.m.m}{l_1} = 5$ gilb/cm, et pour

abscisse à l'origine : $B = \frac{f.m.m}{l_2} = 7\,150$ gauss, son intersection avec la courbe d'aimantation nous donne : $B = 6\,350$ et $H = 0,58$.

Les courbes de la fig. 5 nous donnent pour ces valeurs une perméabilité alternative de 970.

Etant donné qu'il y a un entrefer, calculons la perméabilité apparente.

Nous savons que la création d'un entrefer dans un circuit magnétique diminue l'induction continue dans le fer et entraîne par suite une augmentation très rapide de la perméabilité alternative ; un entrefer paraît donc avantageux dans les circuits magnétiques parcourus par des flux continus.

Il existe toutefois, pour chaque valeur de l'induction continue, une valeur critique de l'entrefer au-dessus de laquelle la diminution de perméabilité provoquée par l'entrefer est supérieure à l'augmentation de la perméabilité alternative due à la diminution de l'induction continue.

Déterminons cet entrefer critique, ainsi que la valeur de la perméabilité apparente maximum obtenue dans ces conditions.

La f.m.m. continue se partage entre les deux réluctances du fer et de l'entrefer suivant la loi :

$$\text{f.m.m} = H_1 l_1 + B_0 l_2, \quad (4)$$

avec H_1 représentant le champ dans le fer et,

B_0 représentant le champ dans l'entrefer.

La courbe d'aimantation, par ailleurs, établit une relation entre H_1 et B_0 .

Il s'agit donc dans le cas présent de résoudre graphiquement l'équation (4) qui représente une droite ayant pour ordonnée à l'origine :

$$B_0 = \frac{\text{f.m.m}}{l_2},$$

et pour abscisse à l'origine :

$$H = \frac{\text{f.m.m}}{l_1},$$

à l'intersection de cette droite et de la courbe d'aimantation, on trouve les valeurs de l'induction et du champ auxquelles travailleront le fer, dans les conditions de f.m.m et d'entrefer donné.

Si nous dérivons l'équation (4) par rapport à B_0 , nous obtenons :

$$\frac{dH}{dB_0} = - \frac{l_2}{l_1},$$

$\frac{dH}{dB_0}$ représente la pente de la droite et la fraction $\frac{l_2}{l_1}$ détermine le rapport de la longueur de l'entrefer à celle du fer.

Utilisons la formule (3).

$$\mu_{app} = \frac{1}{\frac{1}{970} + \frac{0,0105}{15}} = 580,$$

(valeur qui vérifie bien la valeur donnée par la courbe de perméabilité maximum fig. 7).

Le coefficient de self a ainsi pour valeur :

$$L = \frac{4,256 \times 4,000^2 \times 580 \times 5}{15} = 39 \text{ henrys.}$$

La réactance à 50 p : s est donc : 12 200 ohms et le rapport $\frac{L}{Rp} = 6,1$, soit un rapport de tension aux bornes du primaire de 98 pour cent de la tension totale.

Ces deux exemples ont nettement montré les avantages des alliages à haute perméabilité sur les aciers ordinairement employés dans la construction électrique courante, expliquant ainsi la place prépondérante qu'ils ont pris dans ces dernières années, et particulièrement aux Etats-Unis où les constructeurs de transformateurs téléphoniques, utilisent désormais uniquement ces alliages dans leurs fabrications.

Pour terminer, je tiens à remercier les Compagnies : Valley Appliances Inc, Western Electric, Matériel Téléphonique, Gutta Percha et Aciéries d'Imphy, qui ont bien voulu me documenter sur leurs produits, et plus particulièrement M. MALOFF et D^r MINTON, pour l'obligeance avec laquelle ils m'ont confié les résultats de leurs travaux et expériences.

BIBLIOGRAPHIE

- Permeability, T. Spooner, *Jour. A.I.E.E.*, 42, p. 42.
 Effect of Superposed alternating field on apparent permeability and hysteresis loss
 T. Spooner, *Phys. Review*, April 1925, p. 527.
 Notes on the design of Iron-Core reactance which carry direct current, D.E. Replogle
Jour. A.I.E.E., Feb. 1927, p. 128.
 Design methods for soft magnetic material in Radio, J. Minton et I.G. Maloff
Proc. I.R.E., June 1929, p. 1021.
 Die Reversible permeabilität, R. Gans, *Annalender Physik*. Vol. 61 No. 4, p. 379.
 Tscherning, *Jour. de Physique*, Sep. 1925, No. 9, p. 300.
 Permalloy, a new magnetic material of very high permeability, H.D. Arnold, G.W. Elmen, *Jour. of Franklin Inst.* t. 195, 1923, p. 621.
-

LA LIAISON RADIOTÉLÉPHONIQUE PARIS BUENOS-AYRES PAR ONDES COURTES PROJÉTÉES

par M.-R. VILLEM

Ingénieur-Chef du service des grands postes à la Société Française Radioélectrique.

Introduction. — Conditions générales d'une liaison radiotéléphonique sur ondes courtes ; influence du fading sur la forme de l'énergie émise ; concentration de l'énergie radiée ; régulation de l'énergie reçue. — Le circuit. — I. Organes de radiotéléphonie : A. — Système émetteur ; principes ; description de l'ensemble. 1° Matériel d'alimentation en énergie et en réfrigérants. — 2° Matériel d'émission : a) Meuble de commande ; α) élément stabilisé par quartz ; β) étages de doublage ; γ) amplification de la puissance haute fréquence ; δ) étages d'amplification haute fréquence ; b) Meuble d'amplification de grande puissance. 3° Ensemble de modulation et de manipulation. 4° Table de commande. — B. — Ensemble de réception. — 1° Amplification du courant à haute fréquence de l'onde reçue ; 2° Dispositif changeur de fréquence ; 3° Compensation du fading. — C. — Aériens directifs ; projecteurs d'émission et de réception ; alimentation des aériens. — II. Organes de téléphonie. — Ensemble de liaison au réseau d'abonnés. — Résultats obtenus.

INTRODUCTION.

Les essais effectués, au cours des premiers mois de l'année dernière, d'une part entre Paris et l'Algérie et, d'autre part entre Paris et l'Indo-Chine, avaient démontré que les ondes courtes projetées permettaient d'établir des liaisons radiotéléphoniques à très grande distance dans des conditions de sécurité et de régularité suffisantes pour une utilisation commerciale.

Cependant, faute d'installations correspondantes en Algérie et en Indo-Chine, les communications n'avaient lieu que dans un seul sens et il était nécessaire de démontrer la possibilité d'une communication bilatérale duplex, reliée au réseau d'abonnés et n'offrant, pour les usagers aucune différence avec les conversations téléphoniques ordinaires.

C'est pour répondre à ce programme que la liaison Paris Buenos-Ayres a été établie par la Société Française Radio-Electrique, en accord avec la Compagnie Transradio Internationale qui disposait à Buenos-Ayres des installations nécessaires.

CONDITIONS GÉNÉRALES D'UNE LIAISON RADIOTÉLÉPHONIQUE SUR ONDES COURTES.

Il est évident qu'une liaison radiotéléphonique commerciale ne doit pas être influencée, d'une façon importante, par les variations des conditions de propagation des ondes. Or, on sait qu'avec l'utilisation des ondes courtes, ces conditions présentent certaines particularités et leur étude fournit un précieux enseignement pour les caractéristiques à donner aux installations afin d'obtenir une communication satisfaisante. C'est ainsi qu'il importait surtout de réduire l'effet des phénomènes de fading par l'émission d'énergie sous une forme convenable, sa concentration dans la direction du correspondant et enfin, à la réception, par son réglage automatique pour obtenir un niveau constant des courants de parole.

Influence du fading sur la forme de l'énergie émise.

Il semble, actuellement, bien établi que les phénomènes de fading sont produits par la propagation suivant plusieurs trajets différents, variables dans le temps, des ondes transmises par un même émetteur et qui interfèrent à la réception.

On peut, tout d'abord remarquer, que si le fading ne se manifestait que par un affaiblissement accidentel rapide, même considérable, de l'intensité reçue dans le cas de la radiophonie, il serait, à cet égard, moins à craindre que pour la transmission radiotélégraphique, où la mutilation d'un point de signaux Morse peut obliger à la répétition d'un télégramme. Or, l'expérience montre que le fading peut être sélectif, c'est-à-dire dépendre à la fois du temps et de la fréquence et affecter, de façons différentes, des ondes très voisines. Ce phénomène a d'ailleurs été observé même sur ondes moyennes par Ralp Bown, Deloss, Martin et Potter ⁽¹⁾ et l'on conçoit facilement sa répercussion sur les transmissions radiotéléphoniques qui ne peuvent s'effectuer sans la radiation d'énergie sur une bande de fréquence.

Il est d'ailleurs facile de voir, dans l'hypothèse de phénomènes d'interférence, l'influence du fading sélectif sur la qualité de la reproduction de la parole.

(1) La transmission de broadcasting par Ralp Bown, Deloss, Martin et Potter. Proceedings of the institute of Radio engineers.

Considérons, en effet, l'expression d'une onde modulée :

$$v_0 = A[1 + K \sin(\Omega t + \varphi)] \sin \omega t$$

dans laquelle A désigne l'amplitude de l'onde porteuse de pulsation ω , K le pourcentage de modulation effectué à la pulsation Ω et φ le décalage de la modulation par rapport à l'onde porteuse à l'instant considéré. Cette expression peut être développée mathématiquement suivant trois composantes :

$$\begin{aligned} & \frac{AK}{2} \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi] \\ & - \frac{AK}{2} \cos[(\omega - \Omega)t - \varphi] \\ & A \sin \omega t \end{aligned}$$

qui représentent les bandes latérales et

$$A \sin \omega t$$

qui est l'onde porteuse.

Il y a lieu d'observer que ces trois ondes existent réellement et peuvent expérimentalement être séparées sur des récepteurs appropriés.

Par suite du fading sélectif, ces ondes se propagent séparément suivant divers trajets, de telle sorte qu'au moment où elles atteignent le récepteur, non seulement elles ont subi des affaiblissements inégaux, mais elles présentent également entre elles des déphasages différents de ceux existant au départ.

On recevra donc les trois ondes :

$$\begin{aligned} v_1 + v_2 + v_3 &= A_1 \frac{K}{2} \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1] \\ & - A_2 \frac{K}{2} \cos[(\omega - \Omega)t - \varphi_2] \\ & + A_3 \sin \omega t = v \end{aligned}$$

qui, par leur action sur un détecteur, présentant une caractéristique telle que :

$$i = av + bv^2$$

donnent à sa suite, un courant ayant pour composantes à fréquence audible :

$$b \frac{K}{2} A_3 [A_1 \sin(\Omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\Omega t + \varphi_2)] + b A_1 A_2 \frac{K^2}{4} \cos(2\Omega t + \varphi_1 + \varphi_2).$$

Les deux premiers termes représentent la fréquence de modulation et le troisième le facteur de distorsion du détecteur. On voit, par l'examen de cette expression, que l'on pourra observer une distorsion lorsque le troisième terme subsistera seul, c'est-à-dire qu'il y aura fading

sur l'onde porteuse ou lorsque les bandes latérales étant d'amplitudes voisines, leur déphasage sera de 180° . On obtiendrait donc un avantage au point de vue de la distorsion, en supprimant l'onde porteuse à l'émission, mais il est alors nécessaire de la restituer synchrone à l'arrivée à quelques dizaines de périodes par seconde près, pour éviter une transposition de la fréquence des courants de parole altérant l'intelligibilité. Avec des fréquences de 20 000 000 p : s correspondant aux ondes de 15 m, on conçoit qu'un tel synchronisme ne puisse pas être obtenu sans difficulté.

Nous avons supposé, jusqu'à présent, que l'onde porteuse était parfaitement stable et l'on constate que dans ces conditions, la distorsion est peu fréquente et par suite insuffisante pour troubler une conversation. Cette stabilité de la fréquence est d'une importance primordiale qui, d'ailleurs, est particulière aux transmissions radiotéléphoniques sur ondes courtes où, indépendamment des variations de fréquence à longue période qui gêneraient la réception en nécessitant la modification des réglages, les variations de fréquences rapides peuvent, à distance, donner une réception absolument inintelligible.

Considérons, en effet, l'expression d'une onde porteuse d'amplitude A et dont la pulsation moyenne ω varie suivant une loi harmonique entre $\omega + \omega_0$ et $\omega - \omega_0$ à la pulsation ω_1

$$A \sin [\omega + \omega_0 \sin (\omega_1 t + \Phi)] t.$$

La modulation au pourcentage K de cette onde, par une fréquence $f = \frac{\Omega}{2\pi}$ donne une expression complexe de la forme générale :

$$A[1 + K \sin (\Omega t + \varphi)] \sin [\omega + \omega_0 \sin (\omega_1 t + \Phi)] t$$

et qui peut, ainsi que nous l'avons vu précédemment, être décomposée en trois ondes émises simultanément. Par suite de la propagation de ces dernières, en des temps et par des trajets différents, à l'instant où elles atteindront l'antenne réceptrice, elles présenteront entre elles des décalages de phases différents de ceux existant au départ et leur expression sera :

$$A' \sin \left\{ [\omega + \omega_0 \sin (\omega_1 t + \Phi)] t + \Psi_1 \right\}$$

pour l'onde porteuse et :

$$\begin{aligned} & - A' \frac{K}{2} \cos \left\{ \Omega t + \varphi_1 + [\omega + \omega_0 \sin (\omega_1 t + \Phi_2)] t + \Psi_2 \right\} \\ & + A' \frac{K}{2} \cos \left\{ - \Omega t - \varphi_2 + [\omega + \omega_0 \sin (\omega_1 t + \Phi_3)] t + \Psi_3 \right\} \end{aligned}$$

pour les bandes latérales. (Dans ces expressions, afin de simplifier l'écriture, nous avons supposé des affaiblissements égaux, le phénomène étant indépendant de ces derniers).

Après l'action sur un détecteur de caractéristique analogue à celui envisagé plus haut, on trouve, pour les termes relatifs à la fréquence fondamentale de modulation, considérés indépendamment des termes en distorsion (doublages de fréquences) produits par le détecteur lui-même :

1° Interférence de l'onde porteuse avec la bande latérale supérieure :

$$bA^{1/2} \frac{K}{2} \sin \left\{ \left[\Omega + 2\omega_0 \cos \left(\omega_1 t + \frac{\Phi_2 + \Phi_1}{2} \right) \sin \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{2} \right] t + \varphi_2 + \psi_2 - \psi_1 \right\}.$$

2° Interférence de l'onde porteuse avec la bande latérale inférieure.

$$bA^{1/2} \frac{K}{2} \sin \left\{ \left[\Omega + 2\omega_0 \cos \left(\omega_1 t + \frac{\Phi_3 + \Phi_1}{2} \right) \sin \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{2} \right] t + \varphi_2 - \psi_3 + \psi_1 \right\}.$$

On remarque immédiatement que si $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3$, c'est-à-dire dans le cas de propagation par des trajets égaux obliques sur ondes longues, il n'y a pas de distorsion, malgré les variations de fréquence de l'onde porteuse.

Les expressions précédentes montrent que :

1° pour une fréquence constante de modulation appliquée au départ, on reçoit une fréquence continuellement variable et l'on conçoit facilement qu'une modulation par les courants de parole, puisse devenir intelligible à la réception.

2° Lorsque l'onde porteuse présente un scintillement, ce dernier est perçu après détection de telle sorte que la réception est bruyante même sans modulation de l'émetteur.

Il convient également de remarquer que le phénomène se manifeste quelle que soit la bande passante du récepteur.

Nous avons expérimentalement vérifié cette influence des variations de fréquence de l'onde porteuse sous les deux formes qu'elles présentent le plus souvent, d'une part, lorsque ces variations sont produites par la modulation et, d'autre part, quand elles proviennent des lampes génératrices et donnent un scintillement de l'onde émise. Dans les deux cas, malgré la qualité de la modulation contrôlée près de l'émetteur, l'intelligibilité de la parole à distance était toujours médiocre, mais différait suivant le lieu d'écoute et pour un même endroit, se modifiait au cours de la journée.

Concentration de l'énergie radiée.

L'influence de la forme de l'énergie transmise sur la qualité de la réception radiotéléphonique étant ainsi établie, examinons maintenant les avantages obtenus lorsque cette énergie est échangée entre stations munies d'aériens directifs.

On peut considérer comme un résultat acquis par l'expérience, que l'utilisation de tels aériens permet, non seulement d'accroître considérablement l'énergie à la réception, mais encore de réduire notablement les phénomènes d'évanouissement. Ces deux faits semblent d'accord pour montrer une atténuation dans la diffusion des ondes recueillies. La direction de ces dernières peut d'ailleurs couramment être mise en évidence en orientant le diagramme de l'antenne réceptrice, lorsque celle-ci est suffisamment développée et dégagée pour ne pas être influencée par les effets de réflexion sur les obstacles avoisinants et qui masqueraient l'effet principal. On constate même, lorsque l'aérien est très directif, une orientation précise qui exige beaucoup de soin dans le réglage du diagramme pour obtenir l'énergie maximum.

D'autre part, l'emploi d'aériens à directivité unilatérale est également très intéressante aux moments où la propagation a lieu suivant deux arcs de grands cercles opposés, afin d'éviter que le même signal se répète à un intervalle d'une fraction de seconde et s'oppose ainsi à l'échange du trafic.

On peut donc dire que si la facilité de propagation des ondes courtes les destinait particulièrement aux liaisons à grandes distances, la possibilité de diriger leur rayonnement donne un accroissement suffisant de la sécurité des communications pour permettre leur utilisation commerciale, sans exiger une puissance considérable à l'émission.

Régulation de l'énergie reçue.

La conservation d'un niveau des courants de parole indépendant des conditions de propagation est également un facteur essentiel, lorsque la voie radiotéléphonique doit être desservie par le réseau d'abonnés. Le fonctionnement correct des appareils de liaison au réseau restreint en effet les limites de variations du niveau des courants téléphoniques que l'on peut tolérer à la réception. Il est donc nécessaire de compenser les phénomènes d'évanouissement en disposant de régulateurs automatiques de niveau agissant suivant la force des signaux sur la sensi-

bilité du récepteur, qui doit ainsi présenter une très grande réserve d'amplification.

LE CIRCUIT.

Le circuit représenté sur la fig. 1 comprend, en France, une station émettrice située à Sainte-Assise, une station réceptrice établie à Villecresnes et deux lignes téléphoniques permettant de relier ces stations au bureau central de la Compagnie Radio-France à Paris. Au bureau central, ces lignes traversent un appareil de liaison où elles se fusionnent en une seule qui dessert le réseau d'abonnés en passant par le central interurbain.

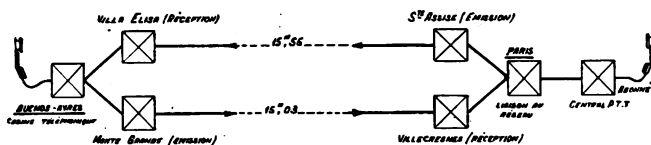


Fig. 1. — Le circuit Paris-Buenos-Ayres.

En Argentine, la liaison est réalisée par l'intermédiaire du centre de Monte Grande pour l'émission et du centre de Villa Elisa pour la réception, situés aux environs de Buenos-Ayres et reliés aux cabines téléphoniques de cette ville.

Les longueurs d'onde utilisées sont de 15, 55 m pour la transmission vers l'Argentine et 15,03 m pour l'autre sens. Ces ondes, déterminées après une série d'essais, ont été choisies de façon à permettre la communication de jour, c'est-à-dire aux moments les plus pratiqués pour les usagers.

Les différentes parties du circuit établies du côté Français peuvent donc être classées de la façon suivante :

1° Les organes radiotéléphoniques proprement dits, constitués par le système émetteur, l'appareil de réception et leurs aériens projecteurs.

2° L'appareillage de téléphonie ou de liaison au réseau d'abonnés, permettant l'échange d'une conversation bilatérale duplex par l'intermédiaire d'une ligne à deux conducteurs.

I. — ORGANES DE RADIOTÉLÉPHONIE

A) *Système émetteur.* — Les conditions de stabilité de l'onde porteuse définies précédemment, conduisent à l'établissement d'un émet-

teur à fréquence commandée dont l'élément générateur présente une très grande régularité de l'onde émise. Avec le fonctionnement des triodes sur ondes courtes, cette caractéristique de l'émission est souvent difficile à obtenir. C'est ainsi que l'on constate expérimentalement qu'un système auto-générateur à lampe, fournit une onde présentant d'autant plus difficilement une régularité suffisante que, d'une part sa puissance est plus élevée et le rapport de l'énergie réactive développée dans les organes d'oscillation à la puissance utile débitée est plus réduit, d'autre part que la longueur d'onde d'oscillation est plus courte. Cette sorte de scintillement de l'onde émise peut d'ailleurs être décelé soit à l'oscillographe, soit à l'écoute sur un récepteur comprenant une lampe détectrice à réaction.

A mesure que l'on s'éloigne des conditions de fonctionnement favorables, le caractère musical des battements obtenus au récepteur cesse, d'abord pour des fréquences graves de ces derniers, puis pour toutes celles de la gamme audible et enfin la note observée devient soufflée et ne donne plus d'accord net au récepteur. L'émission couvre alors une plage de fréquence considérable et la lampe ne pouvant au point de vue instantané entretenir qu'une seule onde, on est conduit à envisager des variations rapides de cette dernière.

Le phénomène étant d'ailleurs indépendant de la qualité du filtrage des sources à courant continu d'alimentation, sa cause ne peut être cherchée que dans les conditions de fonctionnement des triodes et une explication qui peut rendre compte de sa nature est la suivante :

On peut admettre que, sous l'action des courants à haute fréquence qui traversent les triodes, certaines parties des électrodes s'échauffent et libèrent les molécules de gaz retenues à leur surface. Ces molécules traversant l'espace entre électrodes, s'ionisent sous l'action du champ électronique qu'elles tendent alors à combattre. Il en résulte, pendant un très court instant, soit une réduction, soit une interruption du courant filament-plaque modifiant les caractéristiques internes de la lampe qui, abstraction faite de la capacité entre électrodes, se comporte ainsi comme une résistance variable connectée en dérivation sur le circuit oscillant; la fréquence des oscillations entretenues dans ce dernier étant fonction de cette résistance, se trouve alors modifiée. Toutes choses égales, la variation de fréquence présentera la même valeur relative par rapport à la fréquence d'émission et, lorsque cette dernière est très élevée, pourra par suite atteindre une valeur absolue considérable.

L'effet d'ionisation est d'ailleurs plus important pour les lampes puissantes fonctionnant sous des tensions anodiques élevées et dont les

électrodes ont des dimensions importantes. Il croît également quand on augmente la fréquence d'oscillations, par suite de l'accroissement correspondant des courants à haute fréquence traversant les électrodes et des échauffements qu'ils produisent, ainsi que le confirme la diminution du rendement des lampes lorsqu'elles fonctionnent sur ondes courtes.

En ce qui concerne le rapport de la puissance utile de débit à l'énergie réactive dans le circuit d'entretien, cette dernière constitue le volant électrique du système. Dans le cas de cessation ou de réduction du courant électronique, l'énergie réactive tend donc à maintenir l'oscillation pendant un temps d'autant plus long qu'elle est plus importante vis-à-vis de l'énergie réelle.

Ces différentes remarques conduisent à l'établissement d'un organe générateur de faible puissance dont les courants sont ensuite amplifiés pour obtenir l'énergie voulue. De plus, nous avons souvent observé que l'entretien d'oscillateurs par l'intermédiaire d'un quartz piézo-électrique confère à l'onde émise, non seulement une très grande stabilité moyenne, mais également une pureté remarquable; c'est ainsi que son emploi était particulièrement indiqué pour le contrôle de la fréquence d'un émetteur de radiotéléphonie.

On peut également observer que, pour des raisons de fragilité des quartz, il n'est pas possible d'obtenir directement des fréquences d'oscillation de ces derniers aussi élevées que celles correspondant aux ondes courtes. Il est alors nécessaire, pour obtenir la longueur d'onde désirée, d'utiliser un appareillage préparatoire, comprenant des dispositifs multiplicateurs de fréquence qui contribuent, par suite des différentes longueurs d'onde d'accord entre les circuits, à éviter toute réaction de la modulation susceptible de nuire à la stabilité de l'onde porteuse.

Description de l'ensemble d'émission.

L'ensemble d'émission installé à Sainte-Assise peut assurer à volonté la transmission téléphonique ou la transmission télégraphique. Il se divise en quatre groupes principaux :

- 1° un ensemble d'alimentation et de services auxiliaires.
- 2° un émetteur à amplification haute fréquence des oscillations obtenues par quartz piézo-électrique. Il comporte un meuble contenant l'étage d'amplification de puissances équipé avec deux lampes à circulation d'eau et couplé à l'aérien. Cet étage peut être attaqué par l'un ou

l'autre de deux ensembles de commande réglés chacun sur une longueur d'onde et qui comportent les étages de petite et moyenne puissance.

3° Un ensemble de modulation et de manipulation comportant 3 lampes à circulation d'eau et leurs lampes amplificatrices de commande.

4° Un ensemble d'aériens dont nous examinerons les caractéristiques à un chapitre particulier.

1° *Matériel d'alimentation*

L'émetteur à ondes courtes nécessite deux alimentations différentes :

Une alimentation en énergie électrique;

Une alimentation en réfrigérants divers, eau et air;

a) *Alimentation en énergie électrique.* — Elle est assurée par :

1° Un redressement à valves fournissant la tension d'anode de 10 000 V aux 5 lampes à circulation d'eau émettrices et modulatrices.

2° Un ensemble de groupes branchés sur le réseau et actionnant :

une génératrice à 3 500 V fournissant la tension d'anode des lampes de moyenne puissance de l'étage terminal des châssis de commande;

une génératrice à deux collecteurs en série à 550 V fournissant la tension plaque des lampes de faible puissance d'oscillation et de sous-contrôle de modulation;

• une génératrice à 550 V débitant sur potentiomètre et qui permet d'obtenir la tension négative de grille des lampes d'oscillation;

une génératrice à deux collecteurs à 1 500 V pour la tension plaque des lampes de manipulation et la tension de grille des lampes de modulation à circulation d'eau.

3° Deux batteries d'accumulateurs :

une batterie de 240 V permet l'alimentation plaque des lampes de l'étage stabilisé par quartz, de l'amplificateur microphonique et des appareils de contrôle;

une batterie de 12 V assure le chauffage des lampes précédentes et celui des lampes oscillatrices de petite puissance et de l'amplificateur de sous-contrôle.

4° Deux transformateurs assurent le chauffage des lampes à circulation d'eau et des lampes de l'étage terminal du châssis de commande.

b) *Alimentation en réfrigérants* — Elle est obtenue :

1° par un groupe moto-pompe qui entretient la circulation d'eau nécessaire au refroidissement des lampes à grande puissance.

2° au moyen d'une machine soufflante utilisée pour refroidir les différents joints verre métal des lampes émettrices à circulation d'eau.

2° *Matériel d'émission*

Ensemble d'oscillation. — L'émetteur est réalisé de façon à permettre la transmission sur deux longueurs d'ondes correspondant normalement à une onde de jour et une onde de nuit comprises dans la gamme 14 - 32 m. Ainsi que nous l'avons vu précédemment, il comporte trois meubles, dont deux de commande respectivement réglés sur les ondes désirées et un meuble de puissance fonctionnant en liaison avec l'un ou l'autre de ces derniers. On peut ainsi effectuer rapidement le changement de longueur d'onde en modifiant l'accord du circuit d'oscillation de l'étage de puissance. Dans le cas particulier de la transmission téléphonique Paris-Buenos-Ayres, qui s'effectue de jour sur une seule onde, un seul des meubles de commande est utilisé.

a) *Meuble de commande.* — Il comprend l'étage stabilisé, trois étages de doublage de fréquence, un étage d'amplification de petite puissance et un de moyenne puissance.

α) *Élément stabilisé par quartz.* — Il est réglé sur la longueur d'onde de 124,40 m, obtenue par la vibration du quartz sur sa fréquence fondamentale.

Le circuit, dont le montage est indiqué sur la fig. 2 est équipé avec une lampe de 10 W travaillant à une puissance très inférieure à celle correspondant à son régime normal. Le circuit oscillant est relié, d'une part à la plaque de la triode et, d'autre part à la grille de cette dernière par l'intermédiaire du quartz piézo-électrique.

Le milieu de l'inductance du circuit oscillant est relié à la batterie d'accumulateurs de tension d'anode. Les sources d'alimentation étant au potentiel du sol au point de vue des courants à haute fréquence, on obtient ainsi, aux extrémités de la self-inductance d'oscillation des tensions à haute fréquence qui sont égales et de sens inverse.

Une résistance r est disposée de façon à permettre le passage du courant continu de grille.

Enfin, le quartz lui-même est disposé dans une enceinte calorifugée dont la température est réglée automatiquement par un thermostat.

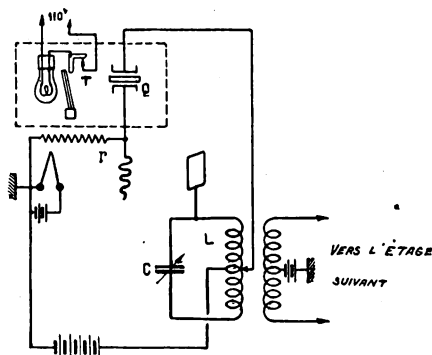


Fig. 2. — Élément stabilisé par quartz.

L. C. : Circuit d'oscillation.

r Résistance de fuite du circuit de grille.

T Thermostat de régulation de la température du quartz Q.

β) *Etages de doublage*. — L'élément stabilisé par quartz est suivi de trois étages de doublage de fréquence reliés en cascade et permettant d'obtenir, dans le circuit de sortie du dernier, la longueur d'onde de 15,55 m d'émission de la station.

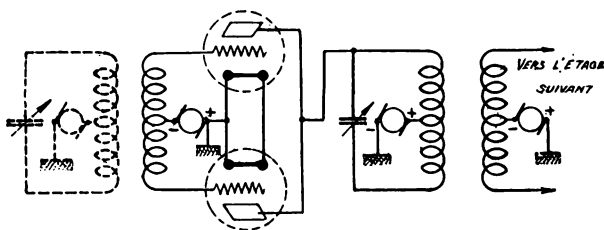


Fig. 3. — Schéma d'un étage doubleur de fréquence.

Chaque étage de doublage, dont le schéma est représenté sur la fig. 3, comprend deux lampes dont les grilles sont au moyen d'une self-inductance, couplées à l'étage précédent, excitées par des tensions instantanées inverses par rapport au filament et dont les plaques débitent en parallèle dans un circuit accordé sur la fréquence double de celle du courant d'excitation. Les grilles des lampes sont polarisées très négativement, de façon à obtenir l'effet de détection produisant le doublage de la fréquence. On règle ainsi le point de fonctionnement vers le début de la caractéristique plaque. Les lampes travaillent à tour de

rôle et produisent, dans le circuit oscillant, une force électromotrice qui reprend le même sens à chaque alternance de la force électromotrice d'excitation et par suite est à une fréquence double de celle dernière.

Les lampes utilisées sur tous les étages de doublage ont une puissance nominale de 10 W et sont alimentées sous une tension d'anode de 550 V et une tension de chauffage de 5,5 V. La puissance du courant haute fréquence à la sortie du dernier doublage est d'environ 10 W.

γ) Amplification de la puissance haute fréquence. — Conditions générales. — L'amplification des courants à très haute fréquence utilisés dans les transmissions sur ondes courtes, nécessite des dispositions spéciales pour obtenir la stabilité individuelle de chaque étage, ainsi que celle des différents étages successifs. Dans le cas envisagé, la réactance de la capacité entre électrodes devient en effet, suffisamment faible pour produire un couplage électrostatique entre grille et plaque susceptible d'entretenir les oscillations dans les circuits.

En outre, il en résulte que, même en l'absence d'un régime d'auto-excitation, le courant du circuit d'attaque des grilles passe directement dans le circuit de sortie sans faire intervenir les propriétés amplificatrices des lampes.

Il est donc nécessaire de compenser l'effet de la capacité grille plaque des lampes par l'emploi de montages ordinairement appelés neutrodynes.

Le montage utilisé comprend, à chaque étage d'amplification haute fréquence, deux lampes en montage symétrique avec neutrodyne double, évitant la réaction du courant traversant le circuit d'entrée sur ceux traversant le circuit de sortie et réciproquement.

Le système est représenté schématiquement sur la figure 4, le circuit d'entrée et le circuit de sortie sont connectés respectivement suivant les diagonales d'un pont dont les quatre branches sont constituées par les capacités grille et plaque des lampes et les condensateurs neutrodynes N_1 , N_2 .

Il est clair que si le pont est équilibré et, en particulier, pour l'égalité des capacités dans chaque branche, lorsque le circuit d'entrée excite les grilles des lampes par des potentiels égaux et symétriques par rapport à celui du milieu de la self-inductance de couplage considéré comme étant au potentiel du sol, il n'y a aucun courant dans le circuit de débit, sauf celui produit par l'effet de relais électronique de la lampe.

Inversement, le courant amplifié traversant le circuit de sortie, ne donne aucun effet de réaction sur le circuit d'entrée et, par suite, l'auto-excitation du système en régime symétrique ne peut avoir lieu. Sur la figure 4, les flèches en trait plein indiquent les sens respectifs du courant d'excitation correspondant au fonctionnement en symé-

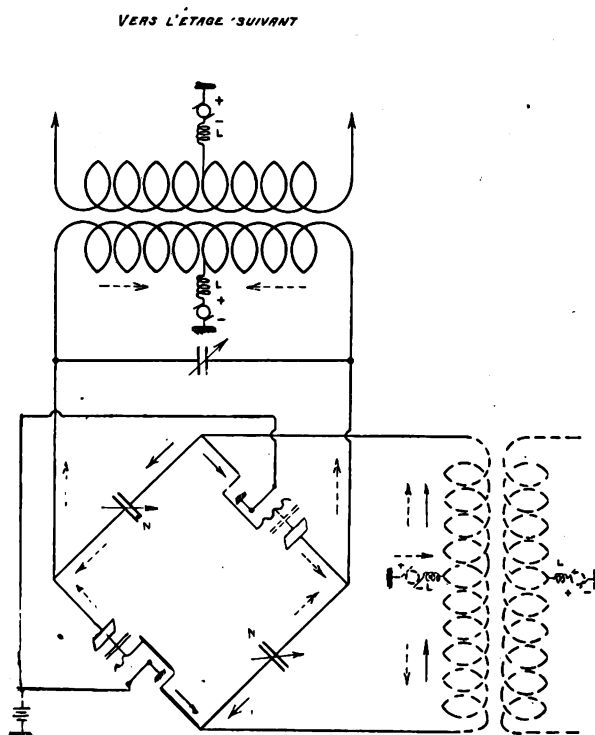


Fig. 4. — Schéma d'un étage d'amplification haute fréquence.

trique. Il y a toutefois lieu de remarquer que la présence des condensateurs neutrodynes n'intervient pas pour empêcher l'auto-excitation du système en régime parallèle, c'est-à-dire pour lequel les tensions haute fréquence respectives des anodes et des grilles sont, par rapport au sol, à chaque instant égales en valeur absolue et en signe.

Dans ce cas en effet, prennent naissance des courants dont le sens est indiqué par des flèches en pointillé et qui se referment par les points milieux des circuits. Une partie de ces courants, traversant le circuit d'entrée, passe à travers le circuit de sortie et réciproquement et par suite tend à produire l'auto excitation du système. On parvient à bloquer le régime d'auto-amorçage en parallèle, en disposant en série,

dans les connexions reliant les points milieux des circuits d'entrée et de sortie à des capacités shuntant les sources d'alimentation d'anode et de polarisation de grille, des self-inductances bobinées en fil résistant et s'opposant au passage du courant à haute fréquence. Il y a lieu

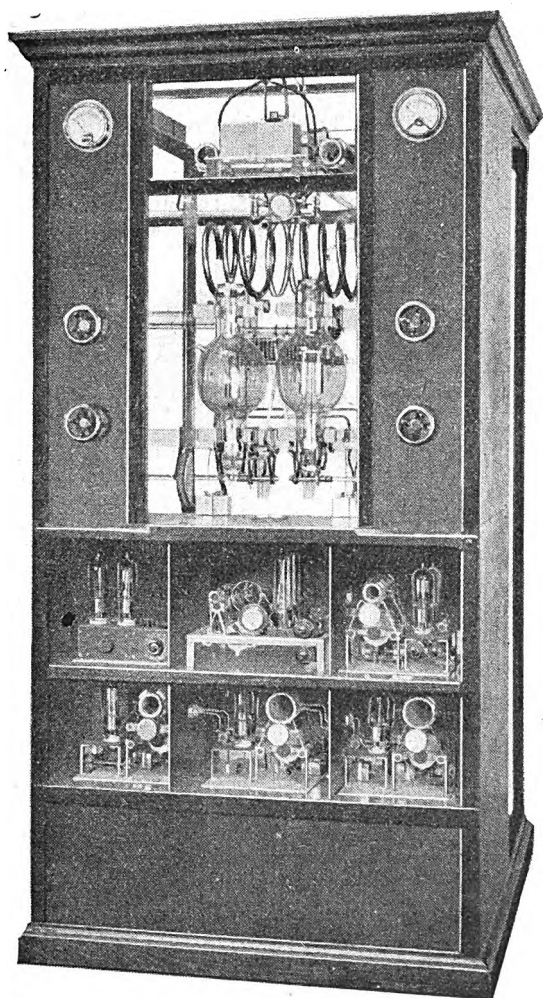


Fig. 4 bis. — Meuble de commande.

d'observer que, pour le régime de fonctionnement normal en symétrique, ces self-inductances de blocage ne sont pas traversées par le courant haute fréquence et par suite n'interviennent pas pour augmenter l'amortissement du système.

δ) *Etages d'amplification haute fréquence.* — Le meuble de commande

comprend, à la suite des étages multiplicateurs de fréquence, deux étages d'amplification haute fréquence; le premier étage comprend deux groupes de lampes d'une puissance nominale de 50 W, montés en symétrique, chaque groupe comprenant deux lampes en parallèle alimentées sous une tension d'anode de 1 100 V et une tension de chauffage de 10 V. Enfin, le second étage utilise deux lampes d'une puissance unitaire de 500 W et qui sont alimentées sous une tension d'anode de 3 500 V et une tension de chauffage de 12,5 V. La puissance débitée par cet étage est normalement d'environ 600 W.

L'équipement du meuble de commande comporte en outre un hétérodyne à fréquence musicale, suivi d'un étage d'amplification, permettant de réaliser la télégraphie modulée en faisant agir ce dernier sur un des éléments émetteurs à faible puissance.

b) *Meuble d'amplification de grande puissance.* — Il comprend un étage d'amplification équipé avec deux lampes à circulation d'eau, alimentées sous une tension d'anode de 10 000 V et une tension de fila-

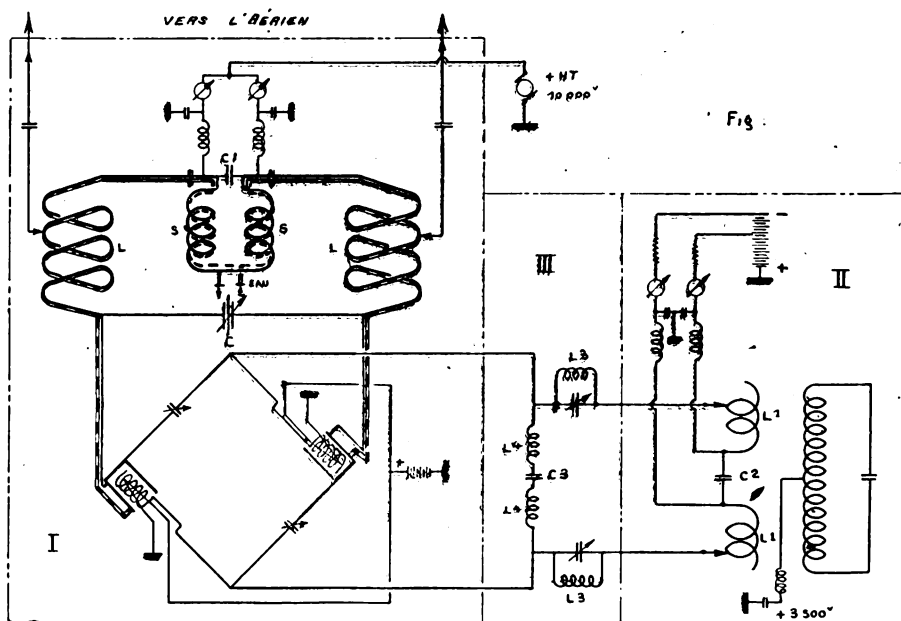


Fig. 5. — Meuble d'amplification de grande puissance : schéma de montage.

ment de 16 V. Les circuits de cet étage débitent dans l'aérien, en télégraphie, une puissance de 12 à 15 kW suivant la longueur d'onde. En téléphonie, la puissance de l'onde porteuse est de 10 kW sur toutes les

longueurs d'onde, une partie de la puissance débitée par le redressement à 10 000 V étant, dans ce cas, fournie aux lampes de modulation.

Le schéma de principe de cet étage est analogue à celui indiqué sur la figure 3. Cependant, des dispositions particulières sont prises pour éviter les pertes dans les canalisations de réfrigération des anodes et pour permettre l'égalisation des débits des lampes, ainsi que la mesure des courants d'anode et de grille pour chacune d'elles.

Sur la fig. 5, représentant le schéma de montage du système, on peut distinguer trois parties, délimitées chacune par un tracé en pointillé.

La partie I est relative au circuit oscillant proprement dit, dont les self-inductances L sont constituées chacune par deux tubes de cuivre enroulés jointivement, l'un est utilisé pour l'arrivée d'eau à la cuve de réfrigération de l'anode et l'autre utilisé pour la sortie.

Ces enroulements sont eux-mêmes raccordés à la distribution d'eau par les serpentins en tube de caoutchouc ss permettant d'obtenir l'isolement pour la tension continue qui est appliquée aux anodes des lampes par l'intermédiaire des self-inductances du circuit oscillant.

Cette disposition évite les pertes haute fréquence dans les canalisations d'arrivée d'eau qui sont reliées au circuit d'oscillation en des points où le potentiel haute fréquence est pratiquement nul, la capacité de jonction C_1 étant dimensionnée de façon à présenter une réactance très faible aux courants du circuit oscillant qui la traversent. Cette capacité permet également de séparer les courants absorbés par chaque anode.

Le système de distribution d'énergie à l'aérien est couplé en dérivation sur les self-inductances d'oscillation à travers des capacités de blocage évitant de le porter au potentiel de la source haute tension d'alimentation des anodes.

La partie II représente le circuit d'excitation du système, les self-inductances L_1 , L_2 de couplage au circuit oscillant du dernier étage du meuble de commande ont leurs extrémités voisines réunies à travers la capacité C_2 permettant de fermer le circuit d'excitation pour les courants haute fréquence et de séparer, pour chaque lampe, le courant continu de grille.

Les lampes sont munies de grid-leak séparés qui peuvent être reliés sur des points différents du potentiomètre de polarisation des grilles. On peut ainsi ajuster la tension négative de grille à la valeur la plus convenable pour l'oscillation de chaque lampe et par suite, dans le cas où les caractéristiques de ces dernières sont un peu différentes, égaliser les puissances absorbées par les anodes.

Les self-inductances de couplage sont reliées aux grilles des lampes au moyen d'une ligne tendue entre les deux meubles et desservant un transformateur élévateur de tension représenté sur la partie III et qui permet également de réduire le régime stationnaire des courants haute fréquence le long de la ligne.

Ce résultat est obtenu en réglant le transformateur de façon que l'impédance moyenne des deux circuits filament grille en série sur lesquels il débite, se comporte, étant ramenée à l'extrémité de ligne

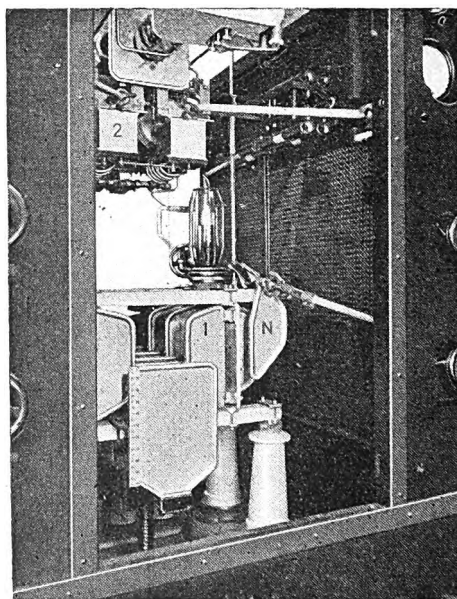


Fig. 6. — Circuit d'oscillation de l'amplificateur de puissance.

comme une résistance pure égale à l'impédance caractéristique de cette dernière; on sait, en effet, que l'impédance de la ligne se réduit à une résistance aux fréquences envisagées.

Le transformateur comprend deux capacités variables d'accord, shuntées par les self-inductances L_3 , L_3 qui offrent une très grande réactance aux courants de haute fréquence, mais permettent le passage du courant continu de grille et deux self-inductances L_4 , L_4 , réunies par la capacité de blocage C_3 de réactance très faible, qui ferme le circuit pour les courants haute fréquence et sépare les circuits de grille pour les tensions continues appliquées à ces dernières.

L'ensemble des organes d'oscillation est spécialement réalisé dans le but de permettre le fonctionnement sur courtes longueurs d'ondes. A

cet effet, ils sont disposés de façon que l'ensemble occupe le plus faible volume possible et groupés de manière à réduire au minimum les connexions de certains organes et même de supprimer les connexions en accolant ces derniers par leurs parties qui doivent être électriquement

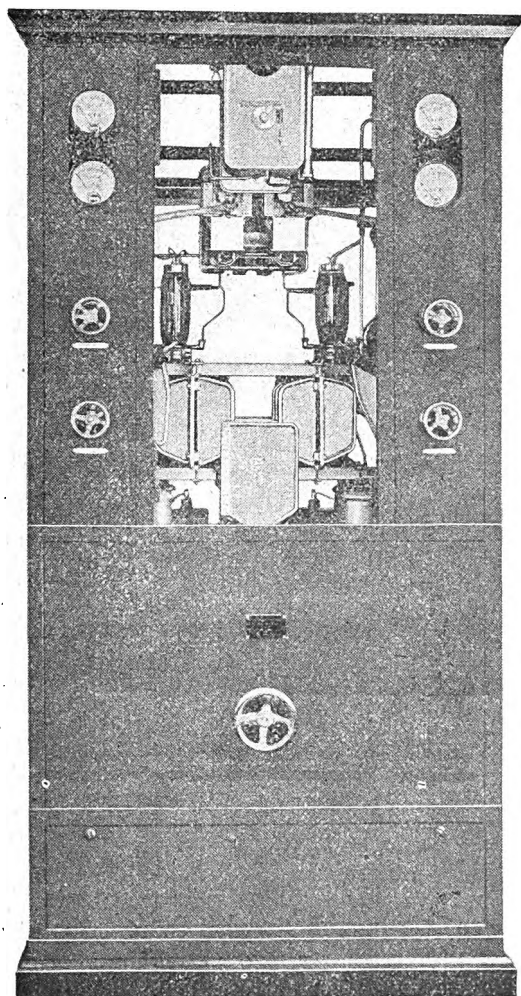


Fig. 7. — Amplificateur de puissance
à deux lampes à circulation d'eau.

réunies. Enfin, pour diminuer l'effet de capacité du système par rapport à la terre, les parties qui le constituent dont le potentiel haute fréquence est faible, sont disposées vers l'extérieur de l'espace occupé par l'ensemble; nous verrons plus loin un autre avantage de cette disposition, en ce qui concerne les condensateurs neutrodynes.

Sur la figure 6, sont représentées en I les organes d'oscillation proprement dits, et en II le transformateur d'attaque des grilles des triodes.

Le circuit oscillant est supporté par des barreaux isolants de quartz soutenus par des porcelaines fixées sur un même socle.

La capacité est constituée en deux parties qui portent chacune les cuves des lampes et les lames fixes; entre celles-ci sont disposées les lames mobiles dont le déplacement est commandé par engrenages au moyen d'un volant. Les self-inductances parcourues par la circulation d'eau sont fixées directement, d'une part aux cuves des lampes et, d'autre part à leurs condensateurs de jonction.

Les condensateurs neutrodynes représentés en N ont chacun leur armature fixe, fixée sur la même toile de fonderie que chaque groupe d'armature fixe du condensateur de circuit oscillant. Les lames mobiles des condensateurs neutrodynes sont disposées vers l'extérieur de l'ensemble d'oscillation; ces lames, étant à faible potentiel au point de vue haute fréquence (potentiel HF de grille par rapport au sol) recueillent ainsi la presque totalité des lignes de force qui, sans leur présence tendraient à se refermer directement des armatures fixes ou de la toile qui les supporte vers le sol; elles permettent, ainsi, de dériver les courants haute fréquence qui en résultent vers la grille de la lampe opposée pour empêcher l'auto excitation du système, sans augmenter, notablement la longueur d'onde du circuit oscillant.

3° Ensemble de modulation et de manipulation.

a) *Modulation.* — La modulation est effectuée par contrôle d'anode sur les lampes du meuble d'amplification haute fréquence de 15 kW.

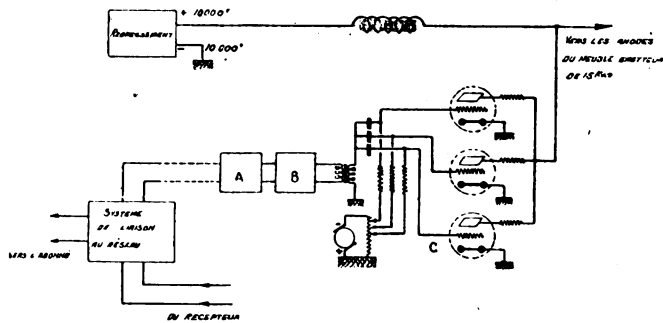


Fig. 8. — Disposition schématique des circuits de modulation téléphonique.

Les circuits de modulation sont représentés schématiquement sur la figure 8. Les courants téléphoniques sortent amplifiés du système de

liaison au réseau d'abonnés situé au bureau central de la Compagnie Radio-France, afin de compenser l'affaiblissement de la ligne de 50 km de longueur reliant ce dernier à Sainte-Assise,

A la station d'émission, les courants de modulation traversent un

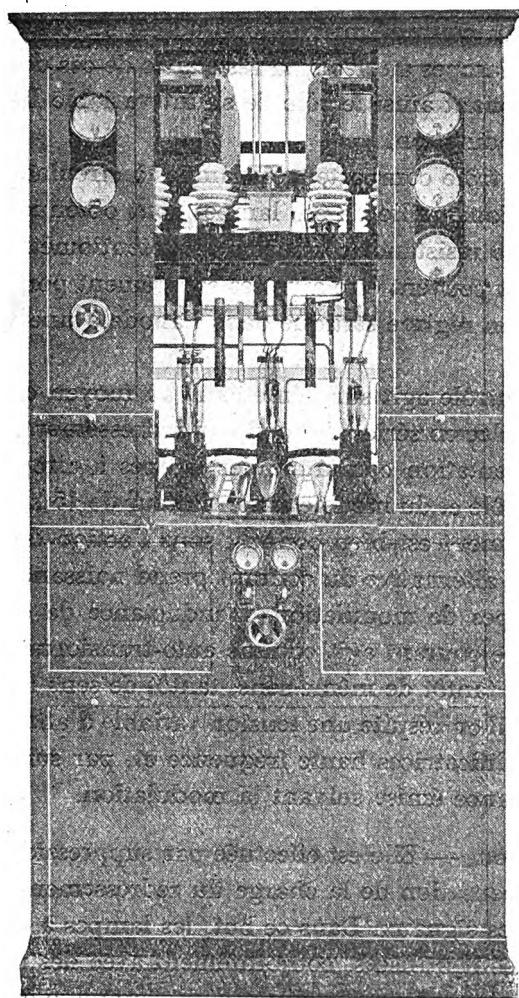


Fig. 9. — Meuble de modulation et de manipulation.

amplificateur microphonique A, puis un étage de sous-contrôle et un étage de contrôle représentés en B et C qui sont tous deux renfermés dans le meuble de modulation et de manipulation proprement dit.

L'amplificateur microphonique comprend 4 étages et permet d'obtenir, sans distorsion, une puissance de 4 W. L'étage de sous-contrôle

est équipé avec 4 lampes en parallèle pouvant dissiper chacune une puissance de 50 W. Il est relié au circuit de grille de l'étage de contrôle par un transformateur portant, en dérivation sur son enroulement secondaire, des lampes au néon.

Lorsqu'un abonné cause trop fort, pendant la durée où la tension correspondant au courant microphonique est supérieure à la tension d'amorçage des lampes au néon, la résistance de ces dernières diminue brusquement, jouant ainsi le rôle de shunt variable limiteur de l'amplitude de la modulation.

L'étage de contrôle comporte trois lampes à circulation d'eau en parallèle. Les tensions grille de ces lampes sont obtenues par des prises variables sur une résistance connectée en potentiomètre sur un collecteur à 1 500 V et peuvent être ajustées séparément pour régler la puissance absorbée en régime statique dans l'anode à une valeur de 5 kW par lampe.

L'étage de contrôle agit sur l'émetteur, au moyen d'une inductance de parole intercalée en série à la sortie du redressement à 10 000 V dans la borne d'alimentation commune des lampes à circulation d'eau du meuble de contrôle et du meuble amplificateur de 15 kW.

Le fonctionnement est bien connu : sous l'action de la modulation, une composante alternative du courant prend naissance dans le circuit plaque des lampes de modulation. L'inductance de contrôle d'anode parcourue par ce courant agit comme auto-transformateur, la tension à ses bornes est, tantôt de même sens, tantôt de sens inverse à celle du redressement et il en résulte une tension variable d'alimentation plaque des lampes amplificatrices haute fréquence et, par suite une modification de la puissance émise suivant la modulation.

b) *Manipulation*. — Elle est effectuée par suppression de l'onde porteuse avec compensation de la charge du redressement pendant les intervalles entre les signaux. Dans ce but, les lampes à circulation d'eau de modulation sont utilisées, conjointement avec des résistances, pour absorber l'énergie lorsque le courant dans l'antenne est supprimé. On parvient ainsi à réduire l'effet des constantes de temps des circuits et permettre des vitesses de manipulation atteignant 250 mots par minute.

4° *Table de commande*.

Les différentes commandes nécessaires à la mise en marche de l'émetteur sont réunies sur une table de commande, portant également

les appareils de mesure principaux. Un châssis, comprenant des boutons d'interrupteurs actionnant des relais, permet d'effectuer la mise en service, soit étage par étage, soit, d'une façon complètement automatique, au moyen d'une seule commande générale; dans ce cas, les dif-

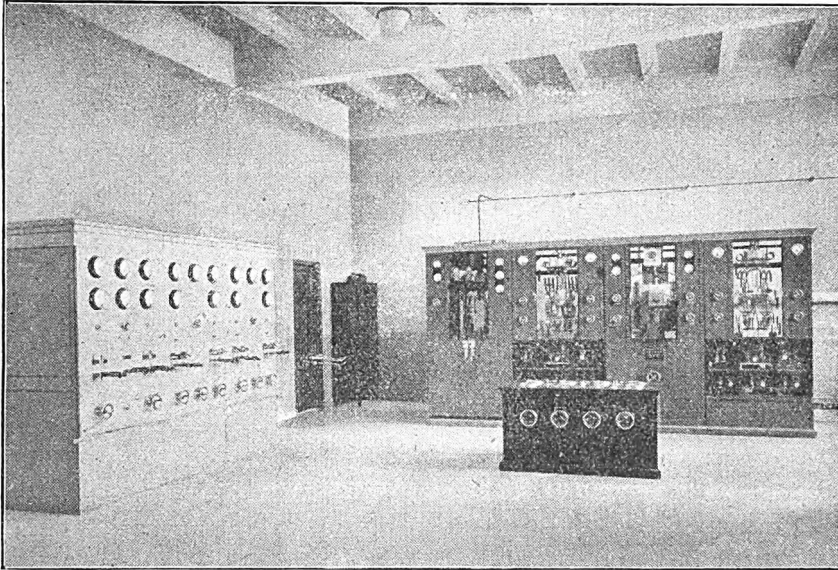


Fig. 10. — Ensemble de l'émetteur de 15 kW stabilisé par quartz piézo-électrique.

férents éléments de l'émetteur entrent en fonctionnement successivement au moyen de relais retardés dont les circuits se contrôlent afin d'éviter toute fausse manœuvre.

B. — ENSEMBLE DE RÉCEPTION

Pour obtenir une qualité et une sécurité de réception permettant une utilisation commerciale, les essais ont conduit à l'établissement d'un récepteur spécialement étudié pour donner le minimum de bruit de fond; tout en présentant une très forte réserve d'amplification, mise en œuvre automatiquement dans les moments où le signal faiblit.

Les caractéristiques principales de l'ensemble de réception consistent dans l'emploi :

a) d'un seul changement de fréquence effectué à la suite d'une amplification très importante de l'onde reçue et par suite opérant sur des signaux d'amplitude relativement grande.

b) de montages permettant de filtrer les composantes indésirables du courant obtenu à la suite du changement de fréquence.

c) d'un système anti-fading contrôlant, sans introduire de distorsion des signaux, un amplificateur moyenne fréquence de façon à obtenir, à la sortie du détecteur attaqué par ce dernier, un courant constant, malgré des variations importantes dans l'amplitude du signal reçu.

1° Amplification du courant à haute fréquence de l'onde reçue.

Elle est obtenue au moyen de 8 étages à résonance montés en symétrique, les trois premiers étant équipés avec des lampes à grille-écran et les suivants munis de triodes neutrodynés suivant la même disposition que celle utilisée à l'émission.

Les deux modes de réalisation ont été étudiés et associés en vue d'obtenir une très grande stabilité malgré l'amplification considérable et de simplifier les manœuvres de réglage en obtenant une indépendance pratiquement complète entre les accords des différents étages. L'expérience a en effet montré que, sur ondes courtes, les étages à lampes écran ne peuvent être reliés en cascade à plus de 3 ou 4 sans présenter d'accrochages parasites occasionnels dus à un effet résiduel entre capacités internes des lampes subsistant malgré l'interposition de l'écran. Par contre, l'association d'un plus grand nombre d'étages de lampes triodes peut, sans inconvénient, être réalisé par suite d'une compensation plus exacte obtenue par le réglage des condensateurs de neutrodyne. On peut observer qu'avec le montage employé, qui est également réalisé d'une façon symétrique au point de vue mécanique, le réglage des condensateurs neutrodynes est valable pour une gamme de longueur d'onde étendue et ne complique pas sensiblement l'emploi de l'appareil.

Pour la longueur d'onde de 15 m, l'amplification en tension réalisée avec chaque étage de lampes à grille-écran a été trouvée comprise entre 5 et 6 et égale à celle des autres étages, bien que les coefficients d'amplification respectifs des lampes utilisées soient respectivement de 80 et 9. Ce résultat est dû à la résistance interne considérable des lampes à écran vis-à-vis de l'impédance ramenée dans le circuit filament-plaque, par le circuit oscillant accordé. Par contre, pour des ondes plus longues, les lampes à écran deviennent notablement plus avantageuses par suite de la possibilité d'une meilleure adaptation du circuit à leurs caractéristiques.

2° Dispositif changeur de fréquence (Fig. 11).

La différence de potentiel à haute fréquence recueillie à la sortie de l'amplificateur précédent, est appliquée aux grilles de commande de deux lampes bigrilles montées en symétrique et neutrodynées. Les grilles de contrôle sont excitées en parallèle par un hétérodyne local à travers un étage d'amplification haute fréquence permettant de filtrer

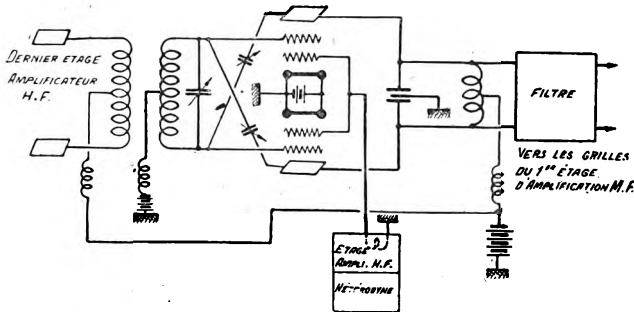


Fig. 11. — Dispositif changeur de fréquence.

les harmoniques de cette dernière. Le circuit de débit des lampes bigrilles attaque l'amplificateur moyenne fréquence à travers un filtre à bande dont l'élément d'entrée comprend un condensateur C ayant son armature centrale reliée au sol. On remarque facilement que l'ensemble permet de soustraire l'amplificateur moyenne fréquence aux courants incidents, en particulier à ceux produits par le générateur local et d'obtenir ainsi un changement de fréquence, dont les bruits parasites sont extrêmement réduits.

3° Compensation de l'effet du fading.

Les phénomènes d'évanouissement observés à la réception des ondes courtes se manifestent souvent par des variations de la puissance reçue dans le rapport de 1 à 1 000. La compensation de telles variations, indépendamment de la réserve d'amplification qu'elle nécessite, ne peut évidemment opérer de façon vraiment utile que si le bruit de fond du récepteur n'est pas trop considérable au moment où celui-ci travaille avec son amplification maximum. On ne peut, en effet, considérer qu'à chaque moment où le fading apparaît, il y ait une diminution correspondante des bruits parasites.

Or, nous avons constaté qu'à égalité d'amplification globale, il y avait intérêt, au point de vue réduction du bruit de fond, à réaliser cette amplification avec la sensibilité maximum des étages à haute fréquence; ainsi, pour conserver l'avantage obtenu par ces derniers, il était nécessaire d'opérer l'amplification variable pour la compensation, en agissant sur les étages moyenne fréquence.

D'autre part, l'amplification moyenne fréquence étant relativement faible, les courants de signaux qui la traversent sont suffisamment importants pour qu'il soit intéressant de faire travailler les lampes dans les parties rectilignes de leurs caractéristiques, malgré l'action de la compensation.

L'ensemble anti-fading établi en vue de répondre à ces différentes conditions, utilise les variations du courant issu du détecteur attaqué par l'amplificateur moyenne fréquence pour modifier l'amplification de ce dernier. L'effet d'asservissement est obtenu en réalisant le couplage entre étages de l'amplificateur moyenne fréquence, par l'intermédiaire de l'espace filament-plaque de lampes de commande, dont le potentiel de grille est produit par le courant détecté.

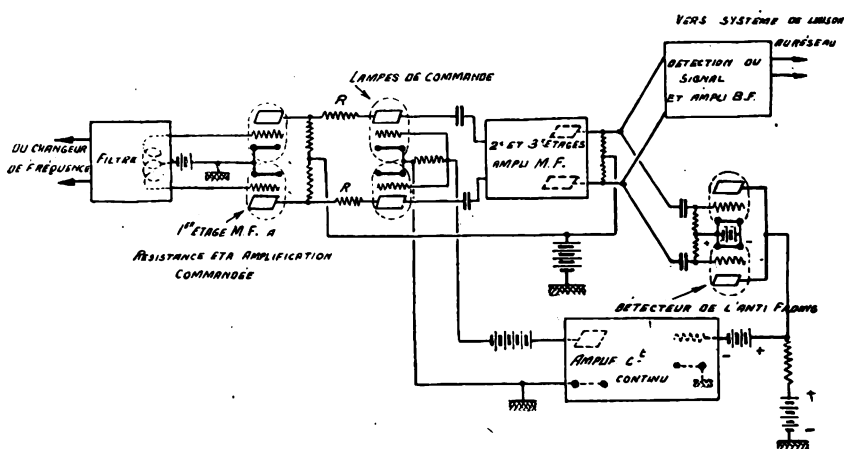


Fig. 12. — Système de compensation des effets du fading.

L'appareil, dont le schéma est représenté sur la figure 12, comprend un amplificateur à courant continu qui permet d'amener à la valeur et au sens convenable les variations du courant fourni par le détecteur. Le courant débité par cet amplificateur traverse une résistance et la tension recueillie aux bornes de cette dernière fournit la polarisation de grille des lampes de commande; celles-ci sont connectées, d'une part

à travers une résistance R , en dérivation sur le circuit d'anode d'un étage de lampes à résistances de l'amplificateur moyenne fréquence et, d'autre part, au circuit d'entrée de l'étage d'amplification suivant.

On conçoit facilement le fonctionnement :

Si, par exemple, l'amplitude de l'onde porteuse tend à augmenter, elle produit, par l'intermédiaire du détecteur et de l'amplificateur à courant continu, une diminution du courant débité par ce dernier et, par suite, de la tension grille des lampes de commande; il en résulte pour celles-ci, une plus faible résistance filament-plaque qui intervient

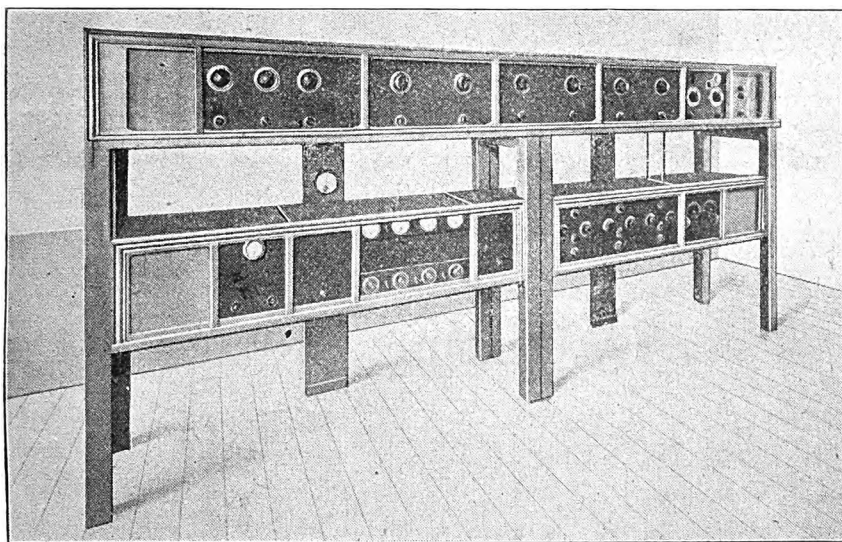


Fig. 13. — Ensemble du récepteur provisoire.

pour diminuer le couplage entre les étages de l'amplificateur moyenne fréquence et par suite s'oppose à l'accroissement d'amplitude de l'onde porteuse.

On peut également remarquer que le circuit filament-plaque des lampes de commande constitue, avec les résistances R , un potentiomètre dont la partie fixe, constituée par ces dernières, ne modifie la valeur maximum de l'amplification que d'une façon négligeable lorsque le signal tombe en fading et au contraire diminue très rapidement l'amplification dans le cas contraire. Il en résulte un effet d'asservissement très énergique qui, de plus, n'entraîne pas de déformation, les résistances R limitant le courant à travers les lampes de commande et, par suite la variation de tension continue sur l'anode des lampes am-

plicatrices commandées qui peuvent ainsi toujours fonctionner dans les parties rectilignes des caractéristiques.

En ce qui concerne l'amplification totale maxima du récepteur, on peut mentionner qu'en utilisant en détecteur le dernier étage d'amplification basse fréquence, qui fournit normalement le courant de ligne de la réception radiotéléphonique, l'apparition de l'onde porteuse de l'émetteur de Buenos-Ayres produit, dans une résistance convenablement adaptée, une puissance de 5 W aux moments de propagation favorables. Si on remarque que par le fonctionnement de l'anti-fading, la puissance des courants téléphoniques est maintenue à un milliwatt, on peut ainsi se rendre compte de la réserve d'amplification obtenue.

C. — AÉRIENS DIRECTIFS.

Les aériens sont constitués par des projecteurs système Chireix et Mesny, permettant de donner au problème de la concentration de l'énergie radiée dans une seule direction déterminée une solution simple, efficace et particulièrement rationnelle.

Les principes de directivité des antennes ont été exposés depuis fort longtemps, notamment dans les travaux de MM. BLONDEL et BELLINI. Ils permettent d'envisager des réalisations nombreuses, telles que celles comprenant des alignements d'antennes traversées, soit par des courants en phase permettant d'obtenir l'effet principal dans la direction perpendiculaire à leur plan, soit par des courants présentant entre eux un déphasage convenable, fonction de la distance entre antennes, afin d'obtenir un effet directif unilatéral dans le plan de ces dernières.

Il apparaît, d'ailleurs, que la technique récente des aériens directifs procède surtout au moyen de rideaux d'antennes verticaux, dans lesquels les éléments radiants sont constitués par des conducteurs de longueur égale à $1/2$ onde alimentés par des courants égaux et en phase pour donner l'effet principal dans la direction perpendiculaire à leur plan commun.

L'utilisation de rideaux est en effet favorable pour obtenir un facteur de concentration élevé dans le plan horizontal et dans le plan vertical et qui est fonction de la hauteur et de la longueur du système par rapport à la longueur d'onde.

Elle permet, de plus, de fixer un grand nombre d'éléments radiants avec le minimum de supports, tout en les maintenant à une hauteur suffisante, afin de bien dégager le faisceau du sol et des obstacles avoisinants.

Le calcul montre d'ailleurs que, pour obtenir un effet directif unilatéral présentant, dans le plan horizontal, un angle de concentration donné, il est avantageux d'alimenter en phase les éléments constitutifs du rideau et d'annuler, au moyen d'un réflecteur, le champ dans une des directions privilégiées obtenues, au lieu de disposer d'une alimentation par courants déphasés donnant directement un effet principal unilatéral. La solution avec éléments en phase donne, en effet, pour un même rapport du développement horizontal du système à la longueur d'onde, une directivité plus accusée.

Il est bien évident que la difficulté principale est de réaliser l'alimentation correcte des éléments, étant donné leur grand nombre. Cette difficulté et, par suite, les chances d'erreurs de réglage, augmente d'ailleurs très rapidement avec le nombre de lignes d'alimentation; elle peut être atténuée en déterminant les lignes de façon à faire desservir par chacune d'elles un certain nombre d'éléments, en remarquant que l'angle entre les vecteurs représentatifs des courants parcourant les lignes reprend la même valeur à chaque longueur d'onde, mais il apparaît bien préférable de réaliser l'alimentation des éléments les uns par les autres en les dimensionnant de façon judicieuse.

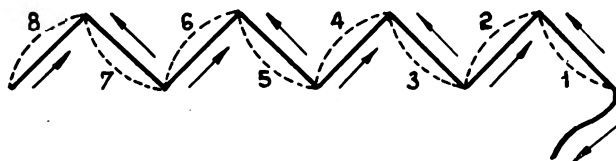


Fig. 14. — Disposition de principe Chireix-Mesny.

C'est ce problème que résout en particulier le projecteur Chireix-Mesny et qui est basé sur la remarque suivante. Considérons un fil développé en zig zag dans un plan (fig. 14) et formé d'éléments 1, 2, 3... 6, 7, 8 d'égales longueurs coudés à angle droit, chaque élément ayant une longueur correspondante à une demi-longueur d'onde. Supposons que le système soit le siège d'ondes stationnaires. Celles-ci pourront, du fait que la phase entre les courants s'inverse à chaque demi-longueur d'onde, être représentées par le trait ponctué indiquant l'amplitude de courant et par les flèches indiquant le sens des courants. On voit ainsi que si la longueur d'onde est convenablement choisie, les éléments impairs sont parcourus par des courants en phase et les éléments pairs par des courants opposés à ceux-ci. Le système est donc équivalent à deux alignements d'antennes en phase et le rayonnement

maximum a lieu suivant la direction perpendiculaire au plan des éléments. On remarque, d'ailleurs, que la propagation le long du fil s'effectue dans d'excellentes conditions, puisque le changement d'impédance qui est obtenu aux endroits coudés est très faible et correspond à des points situés à des nœuds de courants.

Projecteurs d'émission et de réception.

Les aériens utilisés actuellement pour le trafic et établis à titre provisoire, sont une variante du projecteur C. M. type normal décrit ici même par M. CHIREIX et qui est particulièrement avantageux pour

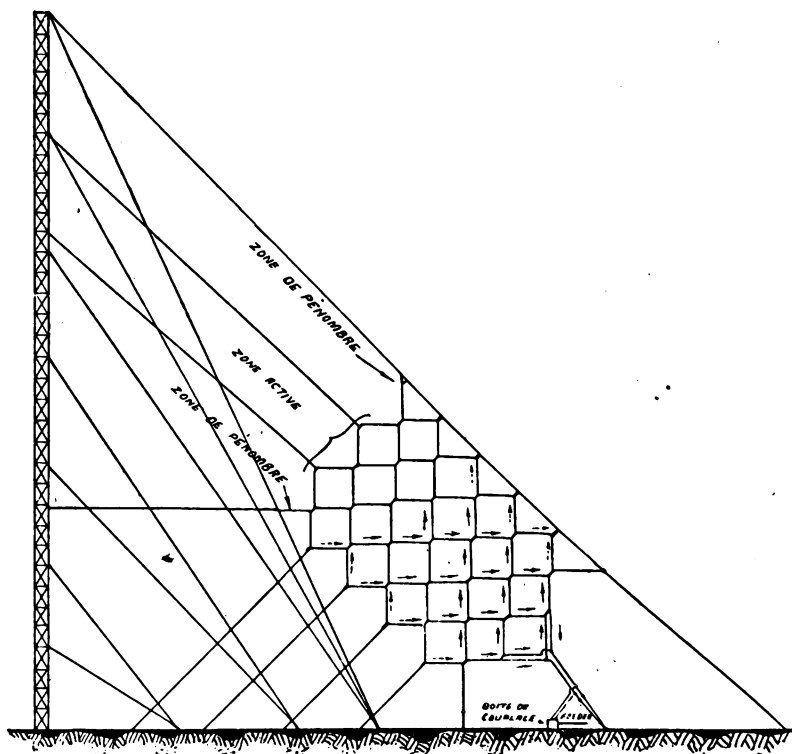


Fig. 15. — Aérien provisoire d'émission.

l'installation de projecteurs à ondes courtes dans des centres de radiotélégraphie à ondes longues du fait qu'elle permet d'utiliser des pylônes existants.

L'aérien d'émission représenté sur la figure 15 est amarré à un des pylônes de 250 m de la station transcontinentale de Sainte-Assise. Il

comprend 4 systèmes élémentaires de fil replié à angle droit, comportant chacun 10 éléments $1/2$ onde. Ces quatre systèmes, qui sont disposés dans le même plan, constituent la zone active du rideau. Ils sont reliés au traversier et aux retenues amarrées au sol, par l'intermédiaire de systèmes élémentaires constituant une zone dite de pénombre, identiques à ceux de la zone active mais non alimentés.

Cette disposition présente l'avantage de permettre la fixation de la zone alimentée sans perturber le régime des courants qui la traversent et l'on peut d'ailleurs observer que les zones de pénombre sont excitées par induction électrostatique avec les parties voisines, dans un sens tel que leur action s'ajoute à celle de la partie alimentée.

La zone active du rideau se termine, à sa partie inférieure, par une descente à deux fils issus chacun de deux systèmes élémentaires dont ils permettent l'alimentation. On remarque facilement que, si ces fils sont portés à chaque instant à des potentiels égaux et de sens inverse par rapport au sol, ils produisent, dans les éléments demi-onde, des courants dont le sens relatif est indiqué par les flèches. L'ensemble de la zone active est alors équivalent à deux alignements croisés à angle droit d'antennes élémentaires constitués chacune par 4 demi-ondes de même sens. Le maximum de radiation a donc lieu dans une direction horizontale perpendiculaire au plan des fils.

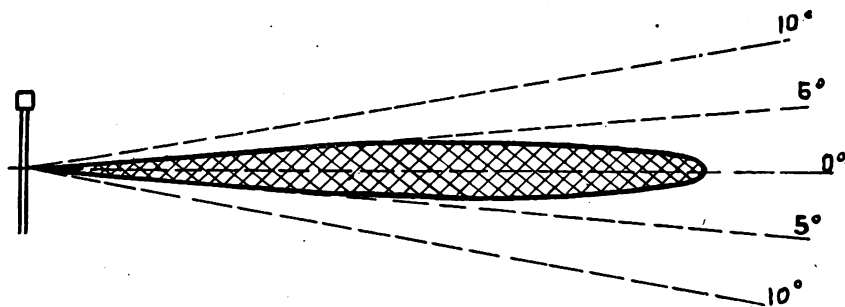


Fig. 16. — Diagramme de directivité.

L'aérien de réception comprend une zone active identique à celle de l'émission mais, par suite de la hauteur plus faible du support dont on disposait, il ne comporte pas de zones de pénombre; par contre, il est muni d'un réflecteur identique à l'antenne proprement dite, disposé à environ un quart d'onde de cette dernière, parallèlement à son plan et permettant d'obtenir un effet directif unilatéral. Le diagramme de directivité du champ électromagnétique obtenu avec cette antenne est donné sur la figure 16.

Alimentation des aériens.

Par suite du développement horizontal des antennes directives à ondes courtes et de la nécessité, dans un centre d'émission ou de réception important qui en comprend plusieurs, de bien les dégager les uns des autres pour ne pas altérer l'effet de concentration de l'énergie radiée, les conducteurs d'alimentation qui les relient aux stations doivent nécessairement assurer plusieurs centaines de mètres représentant dans la plupart des cas 5 à 10 longueurs d'onde.

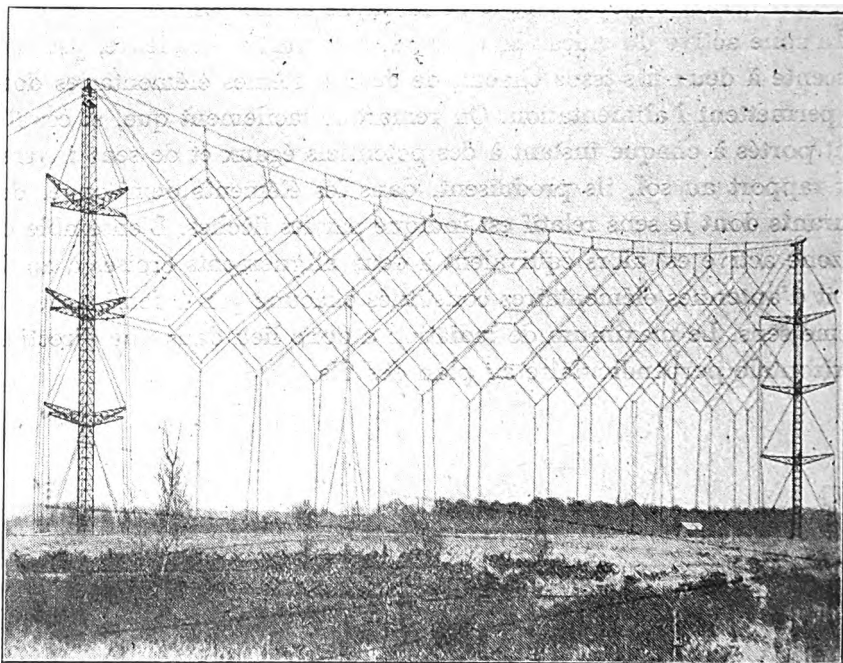


Fig. 17. — Aérien directif Chireix-Mesny établi pour l'émetteur définitif.

Dans ces conditions, il est important d'effectuer la transmission de la puissance avec des feeders qui ne rayonnent pas d'énergie en quantité appréciable, pour ne pas fausser le diagramme de l'aérien, et réglés de façon à présenter aussi peu de pertes que possible.

A cet effet, on utilise des feeders comportant deux tubes concentriques. Le tube extérieur qui est mis au potentiel du sol en de nombreux points de son parcours, forme cage de FARADAY et annule le rayonnement des courants traversant le conducteur isolé auxquels il sert de conducteur de retour.

Enfin, le minimum de pertes ayant lieu lorsque le feeder débite sur son impédance caractéristique, ce qui supprime le régime stationnaire des courants qui le traversent, on est conduit à réaliser cette condition. A cet effet, l'extrémité du feeder est reliée, par l'intermédiaire d'un transformateur, aux fils de descente qui desservent directement l'aérien et sont par suite le siège d'ondes stationnaires. Ce transformateur qui

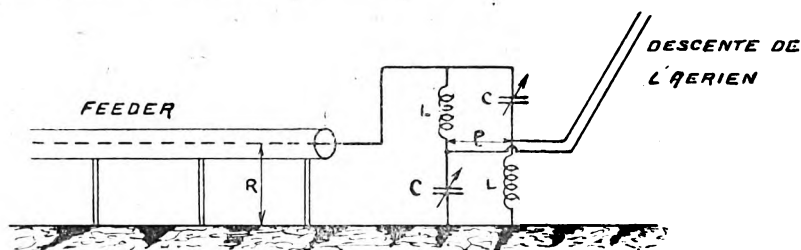


Fig. 18. — Boîte de couplage à l'aérien.

est représenté sur la figure 18, comprend essentiellement deux self-inductances et deux capacités égales montées en pont de Wheatstone et permet également d'obtenir, à sa sortie, les tensions égales et de sens inverse par rapport au sol, appliquées à la descente d'antenne. On démontre facilement que, si le transformateur est disposé en des points de la descente correspondant à un nœud ou à un ventre d'intensité, c'est-à-dire où l'aérien se présente comme une résistance pure ρ , la suppression du régime stationnaire dans le feeder d'impédance caractéristique R est obtenu :

1° en réalisant la condition de résonance :

$$LC\omega^2 = 1 \text{ sur l'onde envisagée,}$$

2° la condition : $\frac{L}{C} = R\rho$

La vérification du réglage peut être effectuée au moyen de 3 ampèremètres placés à l'intérieur du tube extérieur du feeder en face de regards et intercalés sur le conducteur isolé à des distances d'environ $1/3$ d'onde. Les déviations des trois appareils doivent être égales.

II. — ORGANES DE TÉLÉPHONIE

Ensemble de liaison au réseau d'abonnés

Le principe du système de liaison des appareils de réception et des organes d'émission d'une communication radiotéléphonique bilatérale

à une ligne à deux fils desservant un combiné normal, consiste à permettre aux courants provenant de la ligne d'abonnés de traverser les circuits de modulation de l'émetteur, tout en évitant l'action sur ces derniers des courants issus du récepteur et qui traversent eux-mêmes la ligne d'abonnés.

Nous rappellerons que le système « termineur » de liaison classique comprend un transformateur spécial à trois enroulements, connecté

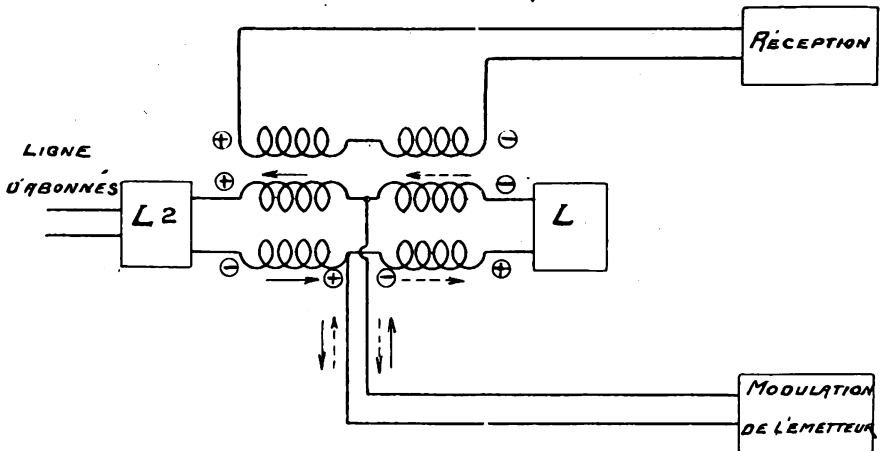


Fig. 19. — Termineur simple.

ainsi qu'il est indiqué sur la figure 19. Lorsque la ligne artificielle L , est réglée de façon à équilibrer exactement la ligne d'abonnés, les courants provenant du récepteur sont sans action sur la ligne aboutissant aux amplificateurs de modulation de l'émetteur.

En effet, dans ces conditions, pour un sens convenable des enroulements du transformateur, donnant, pour les courants issus du récepteur, les polarités des tensions instantanées indiquées sur la figure, la ligne de modulation est traversée par des courants égaux et de sens inverse, si le module et l'argument de la ligne d'équilibre sont identiques à ceux de la ligne d'abonnés.

Il est bien évident que, lorsque l'abonné cause, le courant téléphonique est envoyé vers l'émetteur et vers le récepteur, mais sur ce dernier, qui se trouve alors attaqué par sa sortie, il est forcément sans effet.

L'expérience montre que l'utilisation d'un termineur seul est insuffisant dans le cas de la liaison des appareils de réception et des organes d'émission à un réseau d'abonnés, même en introduisant vers ce der-

nier une cellule de ligne artificielle L_2 pour réduire les variations d'équilibrage.

Dans ce cas, en effet, les lignes d'abonnés ne présentant pas toutes les mêmes caractéristiques, il en résulte toujours dans la pratique, un déséquilibre du système. Une première conséquence de ce déséquilibre est la production de l'écho téléphonique, c'est-à-dire la retransmission par les organes d'émission du courant téléphonique issu du récepteur. Il est à remarquer que cet écho téléphonique est particulièrement gênant dans les liaisons à grande distance, pour lesquelles le

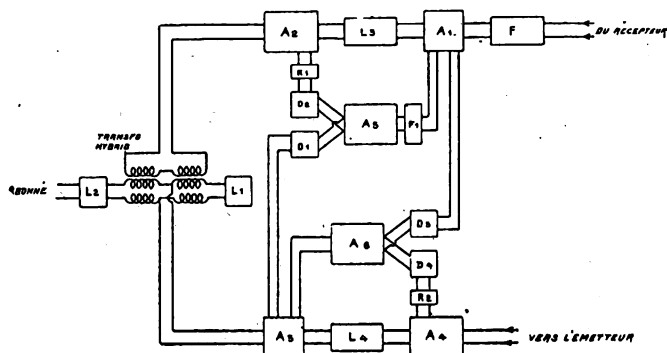


Fig. 20. — Schéma de principe de l'ensemble de liaison au réseau d'abonnés.

temps de propagation n'est plus négligeable c'est-à-dire lorsque l'abonné entend par exemple la syllabe précédant celle qu'il est en train de prononcer.

Cette retransmission peut être facilement supprimée au moyen de dispositifs analogues à ceux utilisés sur les répéteurs téléphoniques et qui bloquent la ligne de modulation dès que les signaux arrivent du correspondant.

Les autres répercussions du déséquilibre ont une importance particulière dans le cas de communications radiotéléphoniques par suite :

1° des bruits parasites issus du récepteur, même s'ils n'apportent aucune gêne à la compréhension de la parole. L'adjonction d'un dispositif de blocage des circuits du récepteur du correspondant au moment où il parle, est insuffisante du fait que, dans les moments d'interruption entre les mots échangés au cours d'une conversation, les bruits sont retransmis d'une extrémité à l'autre et peuvent atteindre un niveau suffisant pour apporter une gêne considérable.

2° du régime d'auto-excitation du circuit qu'ils peuvent provoquer.

Ce régime est supprimé par une diminution de l'amplification totale du circuit mais, si on remarque qu'il y a avantage, au point de vue du rapport signal à parasites à la réception, à faire fonctionner l'émission avec la modulation maximum, on trouve que la réduction de l'amplification devra être effectuée sur les lignes de réception et souvent il y aura intérêt à agir seulement sur une seule d'entre elles. Or, il est bien évident que l'éloignement des opérateurs rend l'opération plus difficile et le mieux est donc de l'éviter dans la mesure du possible.

On parvient à éviter ces inconvénients dans les limites pratiques d'exploitation courante en opérant avec un circuit présentant au moins une de ses branches — ligne de réception ou ligne de modulation — bloquée aussi bien en période de repos qu'au moment de l'échange d'une conversation, le blocage passant évidemment dans ce cas d'une ligne à l'autre.

À la suite de nombreux essais, nous avons été conduits à disposer un appareillage plus complexe, représenté sur la figure 20, dans lequel les blocages sont effectués par suppression du courant d'anode des lampes amplificatrices intercalées dans les diverses parties du circuit.

L'annulation du courant d'anode est elle-même produite par l'application, sur la grille de la lampe, d'une tension redressée négative par rapport au filament et obtenue à la suite d'un détecteur alimenté par les courants téléphoniques; elle ne fait ainsi intervenir aucun organe mécanique susceptible de dérèglement.

Le principe de fonctionnement du système est le suivant :

Les signaux reçus du correspondant, après avoir été filtrés dans le filtre passe-bande F, attaquent l'amplificateur A_1 . Une partie des courants produits est dérivée vers l'amplificateur A_3 , qui actionne les détecteurs D_1 et D_2 . Le détecteur D_1 , fait apparaître une tension négative vers la grille de la lampe amplificatrice A_3 , bloquant ainsi la ligne de modulation de l'émetteur. Le détecteur D_2 fait, au contraire, apparaître une tension positive vers la grille de la lampe amplificatrice A_2 . Cette lampe, qui était normalement bloquée, se trouve débloquée et permet le passage aux courants du récepteur vers l'abonné.

Afin que le début de la première syllabe puisse passer correctement on dispose, entre les lampes amplificatrices A_1 et A_2 une ligne artificielle pupinisée de retardement grâce à laquelle les courants arrivent à la lampe A_2 un certain temps après l'effet de déblocage du détecteur D_2 .

De même, lorsque l'abonné parle, après amplification dans l'amplificateur A_3 une partie des courants est dérivée vers l'amplificateur A_1 .

qui actionne les détecteurs D_3 et D_4 . En même temps que le détecteur D_3 bloque la ligne de réception en faisant apparaître une tension négative sur la grille de la lampe amplificatrice A_1 , le détecteur D_4 rend perméable aux courants téléphoniques la ligne de modulation de l'émetteur, en faisant apparaître une tension positive vers la grille de la lampe amplificatrice A_4 .

Afin que les lampes amplificatrices A_2 et A_4 travaillent toujours en un point déterminé de leurs caractéristiques, c'est-à-dire que les actions de déblocage produites par les détecteurs D_2 et D_4 soient pratiquement indépendantes des volumes de son reçus respectivement du correspondant ou de l'abonné, des lampes régulatrices représentées en R_1 , R_2 sont intercalées d'une part entre le détecteur D_2 et l'amplificateur A_2 , d'autre part entre le détecteur D_4 et l'amplificateur A_4 . Leur fonctionnement est le suivant : En période de repos, la lampe régulatrice R_2 par exemple, débite dans une résistance et bloque la ligne de modulation de l'émetteur en faisant apparaître une tension négative sur la grille de la lampe amplificatrice A_4 . Dès que l'abonné parle, le courant continu fourni par le détecteur D_4 fait cesser le débit de la lampe R_2 . Par cela même, la lampe A_4 se trouve débloquée et travaille en un point bien déterminé de sa caractéristique.

Le circuit de commande de la lampe régulatrice comporte une constante de temps dont l'effet est de prolonger l'action du détecteur de telle sorte que lorsque l'abonné cause d'une façon assez continue, la tension de grille de la lampe commandée ne subisse pas de variation.

Pour éviter le fonctionnement du système de blocage de la ligne de réception sous l'action des bruits parasites, le courant de l'amplificateur qui l'actionne est filtré à travers le filtre à bande F_1 qui laisse passer les fréquences moyennes de la voix.

A la suite des détecteurs, les circuits d'opération des blocages comprennent un ensemble de capacités et de résistances présentant des constantes de temps permettant d'ajuster séparément leur retard et leur prolongation de fonctionnement. On parvient, ainsi, à supprimer l'effet de perturbations brèves telle que celles produites par le jeu des clefs téléphoniques d'opérateurs et à éviter le fonctionnement continu du système sous l'action des amplitudes rapidement variables du courant de parole.

Bien entendu, ces constantes de temps doivent cependant rester suffisamment faibles, de l'ordre de $1/100$ de seconde, pour que leur effet ne soit pas sensible aux usagers.

Enfin, l'effet, de surtensions produites dans les circuits par l'opéra-

tion des circuits de blocage et de déblocage et qui se traduirait par des chocs au récepteur de l'abonné, est rendu imperceptible par l'emploi de montages symétriques à transformateurs sur les étages amplificateurs commandés. De cette façon, les surtensions produites dans les transformateurs de sortie par chacune des lampes au moment de la cessation ou du rétablissement du courant plaque, se compensent mutuellement et ne sont pas transmises à l'étage suivant. On peut d'ailleurs remarquer que ces surtensions sont très réduites par suite de la commande à effet progressif obtenu par la constante de temps des circuits.

III. — RÉSULTATS OBTENUS.

A la suite d'une période d'essais de six mois au cours desquels la mise au point a particulièrement porté sur les systèmes de réception de compensation du fading et de raccordement au réseau, la liaison Paris Buenos-Ayres a été inaugurée le 31 janvier dernier. A cette occasion,

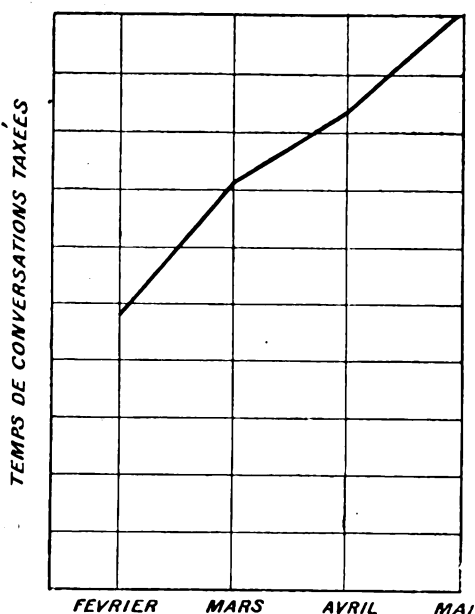


Fig. 21. — Résultats du trafic.

MM. BRIAND, Ministre des Affaires étrangères et Germain MARTIN, Sous-secrétaire d'Etat des Postes et Télégraphes, parlant du quai d'Orsay, se sont entretenus avec leurs collègues argentins MM. OYNAHARTE et Elpidio GONZALEZ. Dès le lendemain, le service était ouvert au public; le

même jour eut lieu l'inauguration officielle du service radiotéléphonique Berne-Buenos-Ayres via Paris. Depuis, de nombreuses communications ont été changées dans d'excellentes conditions non seulement entre Buenos-Ayres et différentes villes de France, mais également avec plusieurs villes étrangères notamment Bruxelles et Amsterdam.

La qualité de la communication a d'ailleurs pu être appréciée par de nombreux auditeurs de T. S. F. qui, ces derniers temps ont écouté les émissions de broadcasting d'Argentine retransmises par les postes de Radio Paris et de l'Ecole supérieure des P. T. T., après avoir emprunté une des branches du circuit radiotéléphonique sur ondes courtes.

On peut considérer que la facilité de conversation et la taxe relativement peu élevée qui est perçue contribuent à l'accroissement du trafic.

C'est ainsi que les relevés mensuels indiqués ci-contre font ressortir actuellement, pour le mois de mai, un temps de conversations taxées, qui est plus du double de celui du mois de février.

Les résultats d'exploitation acquis dès à présent permettent donc de prévoir un brillant avenir aux liaisons radiotéléphoniques à grande distance et montrent que dans l'organisation moderne elles répondent à un réel besoin.

TRANSMISSION SIMULTANÉE DE DEUX COMMUNICATIONS TÉLÉPHONIQUES SECRÈTES

par M. FAYARD,

1^{re} Partie — Principe du système ; influence des suppressions et des décalages de fréquences sur l'intelligibilité des communications ; parole inversée : parole haute ; matériel employé ; cas d'une émission radioélectrique. — 2^e Partie — Description et fonctionnement des organes, 1^o modulateur ; 2^o filtres ; fonctionnement de la cellule ; formules de construction.

PREMIÈRE PARTIE

DESCRIPTION DU SYSTÈME

Influence des suppressions et des décalages de fréquences sur l'intelligibilité.

En raison de la nature même des courants microphoniques qui peuvent toujours être représentés par une série de courants sinusoïdaux de fréquences diverses, on a été depuis longtemps amené à rechercher l'influence sur l'intelligibilité d'une communication, d'une part, de la suppression de certains de ces courants, ce qui revient à dire de certaines fréquences, et d'autre part, du changement de valeur de ces fréquences lorsque leurs intensités relatives ne sont pas modifiées.

On a noté que la suppression de toutes les fréquences dans un intervalle donné conduit à des résultats différents selon la zone choisie. De nombreux expérimentateurs ont effectué des mesures tendant à chiffrer en pour cent les pertes d'intelligibilité résultant de la suppression de telle ou telle bande de fréquences.

Ainsi par exemple, on a noté de 7 à 10 pour cent de perte d'intelligibilité en supprimant toutes les fréquences de la parole comprises entre la plus basse et la fréquence de 500 p. s ; on perd, par ailleurs, 12 à 15 pour cent d'intelligibilité lorsqu'on supprime toutes les fréquences au

(1) Cette communication sera discutée à la Semaine d'octobre le Vendredi 25 octobre 1929.

delà de 2 500 p : s. Finalement, en se basant sur ces chiffres, on note qu'en conservant les fréquences de la parole dans la bande comprise entre 500 et 2 500 p : s, on perd environ 20 pour cent d'intelligibilité.

Il reste, dans ces conditions, 80 pour cent d'intelligibilité. Nous rappelons qu'on appelle perte d'intelligibilité en pour cent le nombre de syllabes incomprises sur 100 syllabes écoutées à la sortie du système étudié. Pour les épreuves d'un système, lorsqu'il s'agit de définir par des chiffres les caractéristiques d'intelligibilité, il convient seulement d'appliquer certaines règles particulières pour établir la liste des syllabes servant aux mesures et pour le calcul du résultat moyen.

L'influence du décalage des fréquences a été plus délicate à observer. Une partie de nos travaux a d'ailleurs été orientée dans le but de connaître avec assez de précision la perte d'intelligibilité qu'occasionne un décalage fixe de toutes les fréquences d'une bande adoptée pour une transmission déterminée. Les expériences ont été effectuées en ne conservant, pour la transmission de la parole, que les fréquences comprises entre 300 et 2 300 p : s et en opérant sur celles-ci des décalages en plus et en moins allant de quelques périodes à 2 600 p : s.

On a noté qu'un décalage ne dépassant pas une vingtaine de périodes ne nuisait pour ainsi dire pas à l'intelligibilité de la transmission; par contre, si l'on effectuait des décalages supérieurs, jusqu'à 200 p : s, on constatait très rapidement une perte d'intelligibilité de l'ordre de 70 pour cent. Au-dessus, la perte d'intelligibilité croît plus lentement pour atteindre un maximum (inintelligibilité complète), lorsque le décalage est de l'ordre de 2 600 p : s.

Nous entendons par bande de fréquence décalée de 2 600 p : s en moins, celle qui résulte de la différence entre le décalage proprement dit et chacune des fréquences de la bande considérée.

Ainsi la bande 300, 2 300 que nous avons choisie, se présentera, après décalage de 2 600 p : s, sous la forme :

$$\begin{array}{rcl} 2\ 600 - 300, & 2\ 600 - 2\ 300 & \text{soit encore :} \\ 2\ 300 & & 300 \end{array}$$

on voit immédiatement que, sous l'effet du décalage, les fréquences graves de la parole sont devenues des fréquences élevées et vice-versa. Sous cette nouvelle forme, la parole est parfaitement incompréhensible. On la désignera dans ce qui suit sous le nom de *parole inversée*.

Si nous considérons maintenant le décalage de 2 600 p : s, en plus,

La nouvelle bande obtenue se présentera sous la forme :

$$\begin{array}{rcl} 2\ 600 + 2\ 300, & 2\ 600 + 2\ 300 & \text{soit encore :} \\ 2\ 900 & , & 4\ 900 \end{array}$$

elle constitue ce que nous appelons de la *parole haute*, en ce sens que les fréquences graves et les fréquences élevées, de la parole se sont trouvées haussées d'une égale quantité; la parole haute est également inintelligible. En résumé, étant données deux communications téléphoniques pour lesquelles on ne conserve que les fréquences comprises entre 300 et 2 300 p : s, on pourra, en les décalant de 2 600 p : s, la première en plus, la seconde en moins, les rendre inintelligibles et définir chacune par un spectre de fréquence distinct ne s'étendant pas au-dessus de 4 900 p : s. La perte d'intelligibilité à consentir pour chacune de ces communications ne dépassant pas 20 pour cent.

C'est exactement cette combinaison que nous réalisons dans le but d'utiliser un même émetteur radioélectrique ou une même paire de fils, pour transmettre simultanément deux communications téléphoniques, chacune d'elles étant inintelligible sur un récepteur normal auquel ne serait pas adjoint un matériel spécial.

Nous allons décrire maintenant le matériel destiné à opérer le décalage des fréquences de la parole, ce sera le matériel émetteur, et celui destiné au rétablissement de la parole, ce sera le matériel récepteur.

Matériel employé.

Ce matériel, tant émetteur que récepteur, comprend essentiellement des filtres électriques à lampes système Chireix, des modulateurs à lampes système S. F. R. conçus pour opérer directement, sur la parole, les décalages en fréquences nécessaires.

Les diverses opérations à effectuer sur les deux communications téléphoniques initiales que l'on se propose de décaler se résument de la façon suivante :

La première communication débarrassée, par l'effet d'un filtre passe-bande, des fréquences inférieures à 300 p : s, et supérieures à 2.300 p : s, est décalée, en plus et en moins, de 2 600 p : s par un modulateur A (fig. 1), un filtre B arrête la bande décalée en plus de 2 600 p : s et laisse passer la bande décalée en moins de 2 600 p : s qui peut se re-

présenter sous la forme :

$$\begin{array}{rcl} 2\,600 & - & 300, \\ 2\,300 & & 300 \end{array} \quad \begin{array}{rcl} 2\,600 & - & 2\,300, \text{ soit :} \\ & & 300 \end{array}$$

constituant ainsi de la parole inversée.

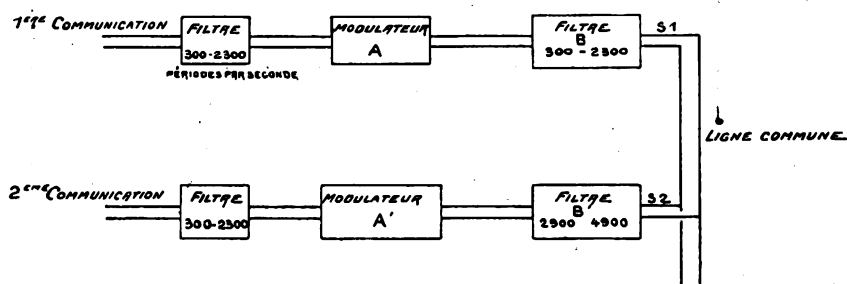


Fig. 1. — Schéma des filtres et des modulateurs produisant le décalage des fréquences.

La deuxième communication également libérée des fréquences supérieures à 2 300 et inférieures à 300 p : s et ne comprenant plus que la bande de fréquence :

$$300 - 2\,300$$

est décalée de 2 600 p : s en plus par un modulateur A', un filtre B' arrêtant la bande de fréquence décalée en moins. En S₁ et en S₂ on dispose de deux bandes de fréquence, l'une occupant le spectre s'étendant de 300 à 2 300, l'autre de 2 900 à 4 900 p : s et représentant, sous cette nouvelle forme, les deux communications téléphoniques initiales.

Ces bandes peuvent être finalement introduites dans la même ligne de transmission pour être utilisées directement — s'il s'agit de communications par fil — ou comme courant de modulation — s'il s'agit d'utiliser un émetteur radioélectrique —. A la réception, soit à l'autre extrémité de la ligne, soit à la sortie du récepteur, on séparera à l'aide de deux filtres électriques les deux communications qui sont restées distinctes, par leur spectre propre de fréquences et on opérera, avec chacune d'elles, les opérations de décalages inverses de celles effectuées à l'émission afin de les rétablir dans leur spectre initial.

Le matériel nécessaire comprendra les mêmes organes que ceux décrits pour l'émission, les filtres B et B' (fig. 1) seront utilisés comme filtres de séparation et les modulateurs A et A', associés aux filtres 300 — 2 300, rétabliront respectivement chacune des deux communications dans leur spectre initial.

On a, d'autre part, vérifié que dans les bandes décalées en plus ou en moins de F , les communications restent tout à fait inintelligibles même si, disposant d'un hétérodyne réglé sur la fréquence F et d'un détecteur, on cherche à effectuer directement le changement de fréquence. On a mis, en effet, en évidence que les termes utiles en changement de fréquence obtenus de cette façon, sont de beaucoup trop faible amplitude devant toute une série d'autres termes audibles; par exemple : les fréquences initiales, les combinaisons additives ou soustractives de leurs harmoniques avec les fondamentales etc...; tous ces termes finalement enlèvent toute possibilité d'écoute des termes utiles.

Cas d'une émission radioélectrique. — Il n'en est plus de même en ce qui concerne l'émission radioélectrique et il convient d'observer que l'inintelligibilité de l'une ou l'autre des communications sera conservée pour autant que l'émetteur aura une fréquence périodiquement variable de quelques centaines de périodes par exemple.

En effet, si nous désignons par f_1 et f_2 les fréquences extrêmes initiales des deux communications, les fréquences extrêmes de ces mêmes communications, après décalage de $\pm F$ — dont nous avons d'ailleurs fixé la valeur à 2 600 p : s — seront :

$$\begin{array}{ll} F - f_1, & F - f_2 \text{ pour la première communication} \\ F + f_1, & F + f_2 \text{ pour la seconde communication} \end{array}$$

Après modulation du poste radioélectrique, fonctionnant sur la fréquence $\mathcal{F}$, le rayonnement haute fréquence sera de la forme :

$$\mathcal{F} \pm (F - f_1), \quad \mathcal{F} \pm (F - f_2)$$

pour la première communication, et :

$$\mathcal{F} \pm (F + f_1), \quad \mathcal{F} \pm (F + f_2)$$

pour la seconde communication.

On conçoit que le changement de fréquence, à l'aide d'un hétérodyne, des courants de réception provenant de ce rayonnement, permette de rétablir une communication — en l'absence de l'autre — dans son spectre initial si l'hétérodyne de modulation est réglée sur la fréquence $\mathcal{F} + F$ ou $\mathcal{F} - F$. Le changement de fréquence conduira à retrouver f_1 , f_2 , les autres termes qui pourraient être produits en même temps n'étant pas susceptibles de gêner parce qu'inaudibles.

Mais l'on peut également conclure que si la fréquence $\mathcal{F}$ n'est pas rigoureusement fixe, le rétablissement opéré dans ces conditions aura un caractère d'inintelligibilité d'autant plus grand que les variations de la fréquence $\mathcal{F}$ seront elles-mêmes plus grandes.

On conférera donc une grande inintelligibilité, sur récepteur normal, aux deux communications envisagées plus haut en donnant à la fréquence $\mathcal{F}$ du poste émetteur la forme :

$$\mathcal{F}(1 - k \sin \omega t).$$

La variation maximum de cette expression étant de l'ordre de 1 000 p : s, la périodicité étant de l'ordre de 15 à 20 par exemple.

Dans ces conditions, à moins de posséder une hétérodyne synchrone, on ne pourra pas, sur récepteur normal, reconstituer des communications intelligibles car, ainsi que nous l'avons indiqué au début du texte, un décalage de 1 000 p : s rend l'intelligibilité pratiquement nulle. Il est évident dans ce cas, que le récepteur normal, auquel est adjoint le matériel de reconstitution des communications devra, au point de vue haute fréquence, être susceptible de recevoir, dans des conditions semblables, toutes les fréquences de la bande limitée par :

$$\mathcal{F} - 500 - (F + f_2), \quad \mathcal{F} + 500 + (F + f_2).$$

DEUXIÈME PARTIE

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DES ORGANES.

1° *Modulateur*. — Le modulateur a pour but, ainsi que nous l'avons indiqué précédemment, de décaler, en plus ou en moins, les fréquences d'une bande déterminée, d'une quantité fixe dite fréquence de modulation et de ne fournir autant que possible que les fréquences décalées, à l'exclusion de toutes les autres, y compris les fréquences initiales.

Nous rappellerons sommairement les caractéristiques générales de la lampe à 3 électrodes qui rentre dans l'établissement de ce modulateur. On peut adopter, comme expression suffisamment approchée des variations d'intensité du courant plaque d'une lampe Δi_p , en fonction des variations de tension appliquées à la grille, ΔV_g , l'équation :

$$\Delta i_p = \alpha \Delta V_g + \beta \Delta V_g^2 + \gamma \Delta V_g^3$$

α , β , γ étant des coefficients susceptibles de varier avec la nature de la lampe et la tension de ses sources, mais que l'on peut considérer comme constants lorsque, le point de fonctionnement étant déterminé, les oscillations incidentes sont d'assez faible amplitude.

On peut d'ailleurs encore écrire :

$$\Delta V_p = \alpha \Delta V_g + \beta \Delta V_g^2 + \gamma \Delta V_g^3$$

ΔV_p , étant la variation de tension observée dans le circuit de plaque.

Si l'on applique simultanément sur la même grille, deux tensions $(\pm)\Delta V'_g$ et $(\pm)\Delta V''_g$ (les signes sont placés pour indiquer que ces tensions peuvent être en phase ou en opposition de phase avec les mêmes tensions appliquées en même temps à d'autres lampes), la variation de tension plaque prend la forme :

$$\Delta V_p = \alpha(\pm)\Delta V'_g(\pm)\Delta V''_g + \beta((\pm)\Delta V'_g \pm \Delta V''_g)^2 + \gamma((\pm)\Delta V'_g(\pm)\Delta V''_g)^3$$

laquelle expression développée conduit à :

$$\Delta V_p = \alpha((\pm)\Delta V'_g(\pm)\Delta V''_g) + \beta(\pm\Delta V'^2_g \pm \Delta V''^2_g + 2(\pm)\Delta V'_g(\pm)\Delta V''_g) + \gamma((\pm)\Delta V'^3_g(\pm)\Delta V''^3_g) + 3\Delta V'^2_g(\pm)\Delta V''_g + 3(\pm)\Delta V'_g(\Delta V''^2_g).$$

On remarque de suite que nous pouvons réaliser, avec 4 lampes, 4 combinaisons différentes en ce qui concerne le sens des tensions $\Delta V'_g$ et $\Delta V''_g$ appliquées en même temps à la grille d'une lampe. C'est par le choix convenable du sens de ces tensions appliquées à chacune des lampes ainsi que de la forme définitive de l'expression :

$$\pm \Delta V_{p1} \pm \Delta V_{p2} \pm \Delta V_{p3} \pm \Delta V_{p4}.$$

sous laquelle on regarde le résultat final, que nous avons pu annuler tous les termes indiqués au deuxième membre de l'équation (1) à l'exclusion de $2\beta\Delta V'_g\Delta V''_g$.

soit : $2\beta a \cos \omega' t . b . \cos \omega'' t$

si : $a \cos \omega' t$ et $b \cos \omega'' t$

désignent les tensions alternatives appliquées sur chacune des grilles.

Ce terme représente finalement le changement de fréquence conduisant à l'obtention des fréquences :

$$\frac{\omega + \omega'}{2\pi} \quad \text{et} \quad \frac{\omega - \omega'}{2\pi}.$$

La disparition des termes de la forme $\Delta V'^2_g$ toujours positifs, exige que l'on regarde le résultat sous la forme évidente :

$$\Delta V_{p1} - \Delta V_{p2} + \Delta V_{p3} - \Delta V_{p4}.$$

D'autre part, la suppression des termes de la forme :

$$\alpha(\pm)\Delta V'_g, \quad \alpha(\pm)\Delta V''_g, \quad \gamma(\pm)\Delta V'^3_g, \quad \gamma(\pm)\Delta V''^3_g$$

exige uniquement que les tensions $\Delta V'_g$ soient toutes en phases, ainsi que les tensions $\Delta V''_g$, ou que, étant alternativement en phase ou en opposition de phase, elles soient convenablement distribuées les unes par rapport aux autres; par exemple, on pourra les distribuer suivant les indications du tableau ci-dessous :

prunt d'énergie à la source que l'on doit filtrer. Enfin, le type de cellules employé permet de réaliser, dans de bonnes conditions, des filtres passe-bande dont la valeur peut atteindre quatre et même cinq fois la fréquence moyenne du filtre. On a établi notamment, avec ce type de cellule, un filtre à bande dans la bande passante 100, 2 500 p : s, la fréquence moyenne géométrique des fréquences extrêmes du filtre, 500 p : s est, dans ce cas, comparée à la bande passante 4,8 fois moins grande.

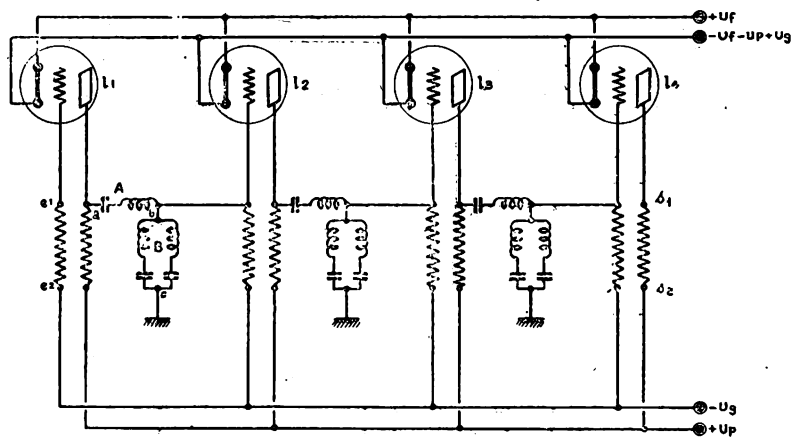


Fig. 3. — Schéma d'un filtre à trois cellules.

On a représenté figure 3, le schéma d'un filtre à 3 cellules. La tension à filtrer est appliquée à l'espace grille filament d'une première lampe L_1 , en e_1 , e_2 , aux bornes de la résistance de fuite de cette lampe, elle est recueillie, après filtrage et amplification, entre les points b et c de la première cellule et transmise de la même façon à la suivante.

Fonctionnement de la cellule. — La cellule est constituée, en somme, de deux parties principales : un shunt résonant A et un circuit antirésonant B et le calcul complet montre que, si l'on fixe à f_1 et f_2 les fréquences limites entre lesquelles on désire réaliser la bande passante, à f' et f'' les fréquences de coupure, c'est-à-dire les fréquences pour lesquelles l'amplitude tombe à une valeur pratiquement nulle, le shunt résonant A d'une part et le circuit antirésonant B d'autre part, seront uniformément réglés sur la fréquence f_0 qui sera la moyenne géométrique $\sqrt{f_1 f_2}$ des fréquences extrêmes de la bande ou $\sqrt{f' f''}$ des fréquences de coupure. On devra, en effet, avoir :

$$\sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{f' f''} = f_0.$$

De plus, les shunts résonants du circuit antirésonant seront respectivement accordés sur f' et f'' . On comprend, dès lors, le fonctionnement de la cellule : la tension en $b c$ est nulle pour les fréquences f' et f'' , puisqu'elle est prise aux bornes mêmes de ces shunts. Si l'on fait abstraction du shunt résonant A, l'amplitude entre ces mêmes pointes suit une loi de résonance et elle atteint un maximum pour la fréquence f_0 . Le shunt résonant A, a pour but d'atténuer cet effet de résonance en dédoublant la résonance principale en deux résonances secondaires dont les fréquences seront voisines de f_1 et f_2 et dont l'amplitude correspondante se trouvera limitée par la résistance interne de la lampe triode.

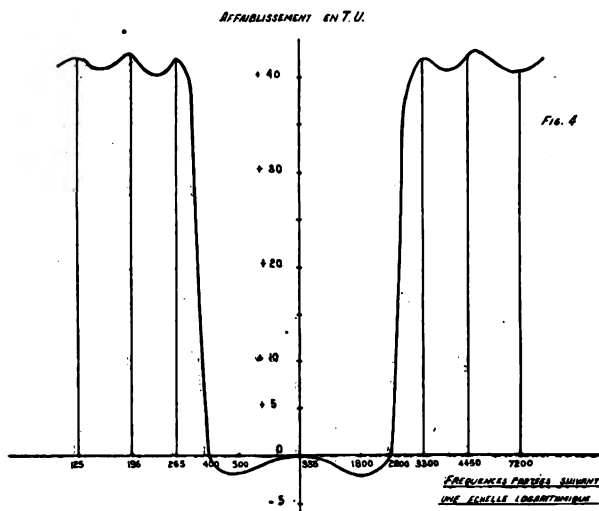


Fig. 4. — Courbe expérimentale obtenue avec filtre à bande S.F.R. de 3 cellules 400-2200 p : s.

La figure 4 représente une courbe de filtrage obtenue avec 3 cellules associées par des lampes triodes ainsi qu'il vient d'être exposé et réglées avec une bande passante 400 — 2 200 p : s.

Formules de construction. — La figure 5, représente, avec leurs notations, les différentes impédances qui rentrent dans la composition de la cellule; l'étude mathématique a été conduite de façon à établir un certain nombre de formules de construction très simples, permettant, connaissant les caractéristiques de filtrage imposées, de calculer les divers éléments de la cellule et de tracer la courbe de filtrage.

1° l'affaiblissement hors bande et, en particulier, pour les fréquences 0 et ∞ ;

2° la bande des fréquences passantes $\delta f_1 = f_2 - f_1$;

3° le rapport de la bande précédente à la bande des fréquences limitées par les fréquences de coupure;

$$\frac{\delta f_1}{\delta F} = K, \quad \text{avec :} \quad \delta F = f'' - f';$$

4° la fréquence moyenne de fonctionnement, reliée d'ailleurs aux

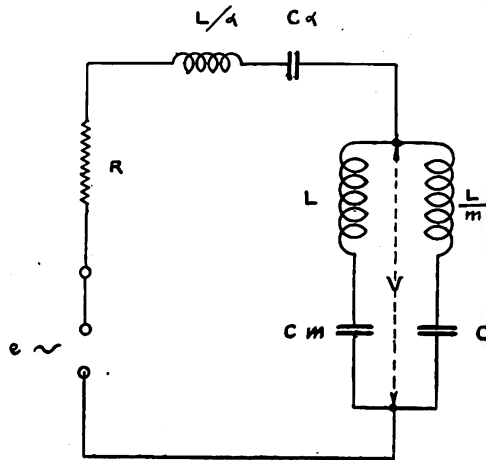


Fig. 5. — Schéma des impédances entrant dans la cellule.

fréquences extrêmes de bande et aux fréquences de coupure, ainsi qu'à chaque groupe de 2 fréquences ayant même affaiblissement par la relation :

$$\sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{f' f''} = f_0.$$

La courbe de filtrage est donnée par la relation :

$$\left(\frac{e}{V}\right)^2 = A(2-A) \left[\frac{1 - \left(\frac{\delta f_1}{\delta F}\right)^2}{1 - \left(\frac{\delta f}{\delta F}\right)^2} \right] \left(\frac{\delta f}{\delta f_1}\right)^2 + \left[1 - (2-A) \frac{1 - \left(\frac{\delta f_1}{\delta F}\right)^2}{1 - \left(\frac{\delta f}{\delta F}\right)^2} \cdot \left(\frac{\delta f}{\delta f_1}\right)^2 \right]^2$$

elle permet de connaître l'affaiblissement pour chaque groupe de 2 fréquences f_1 et f_2 , défini par un intervalle δf avec la condition que nous avons mentionnée $\sqrt{f_1 f_2} = f_0$.

La forme de l'équation montre que l'intervalle des fréquences δf ex-

primé en fonction de la largeur de la bande passante δf_1 et correspondant à un affaiblissement donné $\frac{e}{V}$, est uniquement déterminé par un certain paramètre $A < 2$ (compris pratiquement entre 1 et 2) et par le rapport à la bande passante δf_1 de l'intervalle séparant les deux fréquences de coupure δF .

Dans cette équation A , défini par la relation :

$$\left(\frac{e}{V}\right)_{0,\infty} = 1 + (2 - A) \left[\left(\frac{\delta F}{\delta f_1}\right)^2 - 1 \right]$$

caractérise la qualité de filtrage de la cellule. On peut noter que l'équation générale de la courbe de filtrage est indépendante de f_0 et se rapporte à toutes les cellules ayant uniquement même qualité de filtrage A et même rapport $\frac{\delta f_1}{\delta F}$ de la bande passante à la bande limitée par les fréquences de coupure.

Les affaiblissements étant exprimés en fonction des fréquences, on portera celles-ci suivant une échelle logarithmique de façon à obtenir une courbe symétrique par rapport à l'ordonnée passant par f_0 , la courbe figure 4 a été tracée dans ces conditions. Cette propriété ressort d'ailleurs de la condition $\sqrt{\varphi_1 \varphi_2} = f_0$, φ_1 et φ_2 étant les fréquences définies par un intervalle δf .

Au point de vue constructif, les éléments $\mathcal{L}$, C , x et m sont calculables en partant des équations suivantes :

$$x = \left(\frac{\delta f_1}{f_0}\right)^2 \frac{1}{2 - A} \cdot \frac{1 + \left(\frac{f''}{f_0}\right)^2}{\left(\frac{\delta F}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\delta f_1}{f_0}\right)^2}, \quad m = \left(\frac{f''}{f_0}\right)^2$$

$$\mathcal{L}^2 C \omega_0^2 = 1.$$

Enfin, l'on peut se fixer soit $\mathcal{L}$ soit R (résultant de l'association parallèle de la résistance anodique et de la résistance interne de la lampe), ces deux derniers éléments sont liés par la relation :

$$\frac{R}{\mathcal{L}^2 \omega_0} = \sqrt{A(2 - A)} \cdot \frac{f_0}{\delta f_1} \cdot \frac{\left(\frac{\delta F}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\delta f_1}{f_0}\right)^2}{1 + \left(\frac{f''}{f_0}\right)^2}.$$

Ce seront en général des considérations de réalisation qui fixeront le constructeur sur la valeur de $\mathcal{L}$ à adopter.

SUR LA DÉFINITION DES CAPACITÉS

Par M. ILIOVICI

Capacité d'un conducteur isolé. — Capacités dans un système de p conducteurs. — Distinction entre les capacités propres et les capacités relatives. — Cas de trois conducteurs. — Système de condensateurs équivalent à un système de conducteurs donné — Cas d'un câble armé triphasé : capacité apparente de service ; capacité apparente entre deux des trois conducteurs ; charge des conducteurs. — Relations entre les capacités et entre les perméances de certains tubes de force

Capacité d'un conducteur.

La capacité C d'un conducteur isolé et très éloigné de tous autres conducteurs, de façon à ne pas être influencé par ceux-ci, est définie par le rapport de la charge Q du conducteur à son potentiel V .

On a :

$$(1) \quad C = \frac{Q}{V}.$$

On définit de même la *capacité* C d'un condensateur par le rapport entre la charge Q de l'une des armatures et la différence de potentiel

$$U = V_1 - V_2$$

entre les deux armatures, l'influence des conducteurs voisins étant supposée négligeable. On a, dans ce cas :

$$(2) \quad C = \frac{Q}{U}.$$

Cette définition est un peu moins précise que la première ; elle n'a un sens que si on réalise la charge dans des conditions telles que les deux armatures prennent des quantités d'électricité égales et de signes contraires.

D'autre part, si l'une des armatures enveloppe complètement l'autre, on peut définir la *capacité* C du condensateur par le rapport entre la charge Q du conducteur intérieur et la différence de potentiel U

(1) Ce rapport est la reproduction modifiée et développée d'une « Note » présentée le 16 mars 1929 devant la 6^e section de la Société française des Electriciens et sera discuté à la Semaine d'octobre le samedi 26 Octobre 1929.

entre les deux armatures. On trouve pour C la même valeur que celle donnée par la définition précédente, sans que la somme des masses des deux armatures soit nécessairement égale à zéro ; on obtient d'ailleurs cette dernière condition si le conducteur extérieur est au potentiel zéro.

Dans l'étude des réseaux, on est amené à introduire d'autres *capacités*, par exemple : les capacités entre deux fils d'un feeder, ou la capacité d'un seul fil. Dans tous les cas, ces capacités C sont des *coefficients de proportionnalités entre certaines charges et certains potentiels ou des différences de potentiel*, les charges étant produites dans des conditions particulières et les coefficients C étant choisis de façon qu'ils ne dépendent que des formes, des dimensions et des positions relatives des conducteurs en présence, et de la nature du milieu diélectrique ; ils sont indépendants des charges et des potentiels électriques.

Capacités dans un système de p conducteurs.

Dans le cas le plus général d'un système de p conducteurs $A_1, A_2, \dots, A_p$, chargés d'une façon quelconque, la masse Q_m d'un conducteur A_m sera une fonction linéaire des potentiels $V_1, V_2, \dots, V_p$ des p conducteurs en présence. On a :

$$(3) \quad Q_m = \gamma_{m1}V_1 + \gamma_{m2}V_2 + \dots + \gamma_{mm}V_m + \dots + \gamma_{mp}V_p.$$

Les coefficients γ ne dépendent que des formes, des dimensions et des positions relatives des conducteurs, et de la nature du milieu diélectrique. Le coefficient γ_{mm} , à deux indices égaux, est positif : il est désigné sous le nom de *capacité du conducteur A_m* . Les coefficients de forme γ_{mn} , avec $n \neq m$, sont négatifs : on les appelle souvent *coefficients d'électricité induite*.

Malgré la forme simple de l'expression (3) cette façon de voir nous paraît compliquée surtout à cause de l'emploi de coefficients positifs et négatifs.

On peut exprimer la charge de chaque conducteur sous forme d'une fonction linéaire de son potentiel et des différences de potentiel entre celui-ci et chacun des autres conducteurs. Cette façon de voir a déjà été indiquée par nous ⁽¹⁾ et nous pensons qu'elle est susceptible d'apporter une certaine clarté dans la notion de *capacité*.

(1) Voir : ILIOVICI, *Cours d'Electrotechnique*, livre I, pages 134 et 149.

Dans cette façon d'exprimer les charges des conducteurs, les coefficients de proportionnalité sont des constantes, toutes positives et susceptibles d'interprétations intéressantes.

Capacités propres et capacités relatives.

Si $A_1, A_2, A_3, \dots, A_p$ sont p conducteurs en présence, $V_1, V_2, \dots, V_p$ leurs potentiels, $Q_1, Q_2, \dots, Q_p$ leurs charges, nous écrirons :

$$(4) \quad \begin{cases} Q_1 = C_{01}V_1 + C_{12}(V_1 - V_2) + C_{13}(V_1 - V_3) + \dots + C_{1p}(V_1 - V_p), \\ Q_2 = C_{02}V_2 + C_{12}(V_2 - V_1) + C_{23}(V_2 - V_3) + \dots + C_{2p}(V_2 - V_p), \\ Q_3 = C_{03}V_3 + C_{13}(V_3 - V_1) + C_{23}(V_3 - V_2) + \dots + C_{3p}(V_3 - V_p), \\ \vdots \\ \vdots \end{cases}$$

On peut mettre les expressions ci-dessus sous une forme plus homogène en posant :

$$\begin{aligned} V_1 = U_{10} \quad V_1 - V_2 = U_{12} \quad V_2 - V_1 = U_{21} \quad V_2 = U_{20} \\ V_1 - V_3 = U_{13} \quad V_3 - V_1 = U_{31} \quad \dots \end{aligned}$$

U_{10} est la différence de potentiel entre le conducteur A_1 et l'infini, U_{12} la différence de potentiel entre ce conducteur et A_2 , U_{21} la différence de potentiel entre les conducteurs A_2 et A_1 , ... et ainsi de suite, chaque différence de potentiel étant toujours considérée comme la différence entre le potentiel du conducteur dont l'indice concorde avec le premier indice de U et celle du conducteur dont l'indice est égal au deuxième indice de U . Ainsi on aura :

$$U_{mn} = V_m - V_n \quad \text{et} \quad U_{nm} = V_n - V_m = -U_{mn}.$$

Avec ces notations les formules (4) deviennent :

$$(4') \quad \begin{cases} Q_1 = C_{01}U_{10} + C_{12}U_{12} + C_{13}U_{13} + \dots + C_{1p}U_{1p}, \\ Q_2 = C_{02}U_{20} + C_{12}U_{21} + C_{23}U_{23} + \dots + C_{2p}U_{2p}, \\ Q_3 = C_{03}U_{30} + C_{13}U_{31} + C_{23}U_{32} + \dots + C_{3p}U_{3p}, \\ \vdots \\ \vdots \end{cases}$$

Nous désignons les coefficients $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0p}$ sous les noms de *capacités propres* de chacun des conducteurs en présence des autres conducteurs ; tandis que les coefficients $C_{12}, C_{13}, C_{23}, \dots, C_{mn}$, sont les *capacités relatives* de deux des conducteurs en présence des autres. Les *capacités propres* et *relatives* sont les *capacités élémentaires*.

Remarque. — On obtiendra les mêmes formules (4) et (4') si on considère les p conducteurs $A_1, A_2, \dots, A_p$, enfermés dans une enve-

loppe conductrice A_0 complètement fermée au potentiel zéro. Dans ce cas $U_{10}, U_{20}, \dots, U_{p0}$ représentent les différences de potentiel entre chaque conducteur et l'enveloppe ; $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0p}$ les *capacités relatives* de chaque conducteur par rapport à l'enveloppe en présence des autres conducteurs.

La charge Q_0 de l'enveloppe sera égale à :

$$-(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_p) = -\Sigma Q_p.$$

Cas de 3 conducteurs.

Pour simplifier l'écriture nous allons nous limiter dans la suite, à 3 conducteurs, les résultats obtenus étant d'ailleurs généraux.

Avec 3 conducteurs on a ;

$$5 \quad \begin{cases} Q_1 = C_{01}V_1 + C_{12}(V_1 - V_2) + C_{13}(V_1 - V_3) \\ Q_2 = C_{02}V_2 + C_{12}(V_2 - V_1) + C_{23}(V_2 - V_3) \\ Q_3 = C_{03}V_3 + C_{13}(V_3 - V_1) + C_{23}(V_3 - V_2) \end{cases}$$

et :

$$(5') \quad \begin{cases} Q_1 = C_{01}U_{10} + C_{12}U_{12} + C_{13}U_{13} \\ Q_2 = C_{02}U_{20} + C_{12}U_{21} + C_{23}U_{23} \\ Q_3 = C_{03}U_{30} + C_{13}U_{31} + C_{23}U_{32} \end{cases}$$

avec : $U_{21} = -U_{12}, \quad U_{31} = -U_{13} \quad \text{et} \quad U_{32} = -U_{23}$

Système de condensateurs équivalent à un système de conducteurs donné.

Soit a_0, a_1, a_2, a_3 quatre points (fig. 1). Plaçons des condensateurs

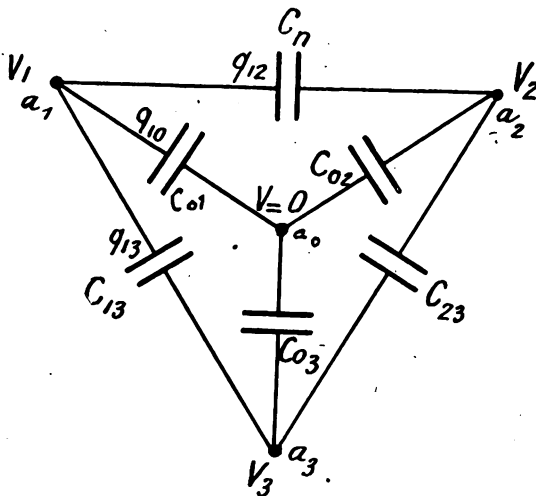


Fig. 1

entre ces points deux à deux, de capacités égales à $C_{01}, C_{02}, C_{12}, \dots$ comme il est indiqué sur la fig 1. Soit $q_{10}q_{12}q_{13}$ les charges sur les trois

armatures qui aboutissent au point a_1 . On a :

$$q_{10} = C_{01}V_1 \quad \text{ou} \quad q_{10} = C_{01}U_{10};$$

$$q_{12} = C_{12}(V_1 - V_2) \quad \text{ou} \quad q_{12} = C_{12}U_{12}$$

$$\text{et :} \quad q_{13} = C_{13}(V_1 - V_3) \quad \text{ou} \quad q_{13} = C_{13}U_{13}.$$

La charge totale des armatures reliées au point a_1 est :

$$q_{10} + q_{12} + q_{13} = C_{01}U_{10} + C_{12}U_{12} + C_{13}U_{13} = Q_1,$$

charge du conducteur A_1 . On démontrera de même que la charge totale des armatures aboutissant au point A_2 est égale à la charge Q_2 du conducteur A_2 et que celle des armatures aboutissant à a_3 est égale à la charge Q_3 du conducteur A_3 .

Nous disons que le système de condensations $C_{01}, C_{12}, \dots$ est équivalent au système de conducteurs A_1, A_2, A_3 .

Cas d'un câble armé triphasé.

La considération des systèmes de condensateurs équivalents à des systèmes de conducteurs donnés permet de résoudre d'une façon simple et instructive certains problèmes pratiques concernant les capacités.

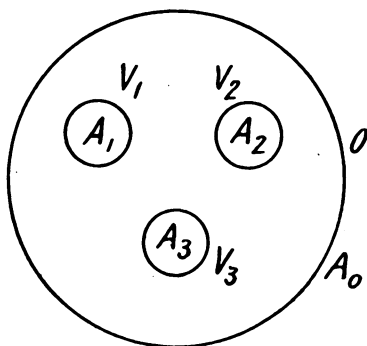


Fig. 2. — Câble à 3 conducteurs.

Considérons, comme exemple, un câble armé triphasé dont la fig. 2 représente une section schématique. Soient V_1, V_2, V_3 les potentiels des 3 conducteurs, supposés triphasés, équilibrés et sinusoïdaux (1); on a : $V_1 + V_2 + V_3 = 0$.

On suppose de même les conducteurs identiques et placés identiquement par rapport à l'enveloppe cylindrique et l'un par rapport à

(1) Si les tensions ne sont pas sinusoïdales les résultats sont vrais pour le terme fondamental.

l'autre. On a, dans ces conditions,

$$C_{01} = C_{02} = C_{03} = C \quad \text{et} \quad C_{12} = C_{23} = C_{13} = C',$$

et les formules (5) deviennent après simplification :

$$(6) \quad Q_1 = (C + 3C')V_1, \quad Q_2 = (C + 3C')V_2, \quad Q_3 = (C + 3C')V_3.$$

Le coefficient $C_s = \frac{Q_1}{V_1} = \frac{Q_2}{V_2} = \frac{Q_3}{V_3} = C + 3C'$ est désigné sous le nom de *capacité de service* pour le terme fondamental, ou plus simplement, *capacité de chaque conducteur pour le terme fondamental des tensions*.

Le coefficient $C_s' = \frac{Q_1}{V_1 - V_2} = \frac{Q_1}{2V_1} = \frac{C + 3C'}{2}$ est la *capacité entre les deux conducteurs A_1 et A_2 pour le terme fondamental*, C_s et C_s' doivent être considérées comme des *capacités apparentes*.

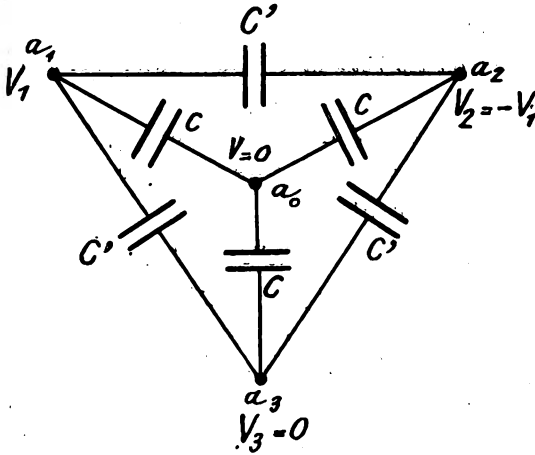


Fig. 3. — Capacités dans un câble à 3 conducteurs.

On peut trouver les expressions (6) d'une façon très simple par la considération du système de capacités équivalent au câble, système donné par la fig. 3.

La condition $V_1 + V_2 + V_3 = 0$ est satisfaite, en particulier, pour $V_3 = 0$ et $V_2 = -V_1$; dans ces conditions les points a_0 et a_3 étant au même potentiel 0, le condensateur compris entre ces points ne reçoit aucune charge (fig. 3). On voit facilement que l'ensemble équivaut à 3 condensateurs en *parallèle* entre les points a_1 et a_2 ; le condensateur C' , monté directement entre a_1 et a_2 ; les deux condensateurs C en série montés entre a_1 et a_0 et entre a_2 et a_0 , la capacité équivalente à ces deux condensateurs est $\frac{C}{2}$; enfin les deux condensa-

leurs C' entre a_1 et a_3 et entre a_2 et a_3 , leur capacité équivalente est $\frac{C'}{2}$.

L'ensemble des 3 condensateurs en parallèle entre a_1 et a_2 a donc pour capacité $C' + \frac{C}{2} + \frac{C'}{2} = \frac{C + 3C'}{2}$ et la charge de ce condensateur équivalent à l'ensemble, ou charge de toutes les armatures comptées au point a_1 , est $Q_1 = \frac{(C + 3C')}{2} (V_1 - V_2)$, ou en tenant compte de $V_2 = -V_1$: $Q_1 = (C + 3C')V_1$, qui est la première relation (6). On a de même $Q_2 = -Q_1 = (C + 3C')V_2$, deuxième relation (6). — On trouvera de même la troisième relation en supposant $V_2 = 0$ et $V_3 = V_1$.

Relations entre les capacités élémentaires C_{01} , C_{02} , C_{12} , C_{13} , ... et les perméances ou les réluctances de certains tubes de force

1° Reprenons le cas général de conducteurs de forme quelconque et supposons d'abord tous les conducteurs au même potentiel $V_1 = V_2 = V_3$. Les équations (5) deviennent :

$$(5'') \quad Q_1 = C_{01}V_1, \quad Q_2 = C_{02}V_2 \quad \text{et} \quad Q_3 = C_{03}V_3.$$

De chaque conducteur part un tube de force qui aboutit à l'infini : si $\mathcal{R}_1$ est la perméance et $\mathcal{R}_1$ la réluctance du tube de force qui part de A_1 ; $\mathcal{R}_2$ et $\mathcal{R}_2$ pour A_2 , et $\mathcal{R}_3$ et $\mathcal{R}_3$ pour A_3 , on démontre facilement qu'on a :

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} C_{01} = \frac{1}{4\pi} \mathcal{R}_1 = \frac{1}{4\pi\mathcal{R}_1}, \quad C_{02} = \frac{1}{4\pi} \mathcal{R}_2 = \frac{1}{4\pi\mathcal{R}_2} \\ \text{et} \quad C_{03} = \frac{1}{4\pi} \mathcal{R}_3 = \frac{1}{4\pi\mathcal{R}_3}. \end{array} \right.$$

Donc la capacité propre de chaque conducteur est égale au produit par $\frac{1}{4\pi}$ de la perméance (ou l'inverse de la réluctance) du tube de force qui va du conducteur vers l'infini lorsque tous les conducteurs sont au même potentiel.

2° Supposons :

$$V_1 = V_2 = 0 \quad \text{et} \quad V_3 > 0;$$

la formule (5) devient :

$$(5''') \quad Q_1 = -C_{13}V_3, \quad Q_2 = -C_{23}V_3, \quad Q_3 = (C_{03} + C_{13} + C_{23})V_3.$$

D'autre part, on peut remarquer que $V_1 = V_2 = 0$, aucune ligne

de force ne part des conducteurs A_1 et A_2 vers l'infini ; par contre, du conducteur A_3 partent trois tubes de force dont l'un va à l'infini et les deux autres vers les conducteurs A_1 et A_2 .

Si on désigne par $\mathcal{P}_{13}$ et $\mathcal{R}_{13}$ la perméance et la réluctance du tube de force dont les extrémités aboutissent aux conducteurs A_1 et A_3 ; $\mathcal{P}_{23}$ et $\mathcal{R}_{23}$ les mêmes quantités pour les tubes de force entre A_2 et A_3 , on démontre facilement les relations :

$$(8) \quad C_{13} = \frac{1}{4\pi} \mathcal{P}_{13} = \frac{1}{4\pi\mathcal{R}_{13}} \quad \text{et} \quad C_{23} = \frac{1}{4\pi} \mathcal{P}_{23} = \frac{1}{4\pi\mathcal{R}_{23}},$$

d'où on déduit que ;

La capacité relative de deux conducteurs faisant partie d'un système de plusieurs conducteurs est égale au produit par $\frac{1}{4\pi}$ de la perméance (ou l'inverse de la réluctance) du tube de force qui réunit les deux conducteurs, lorsque l'un d'entre eux étant à un potentiel différent de zéro, tous les autres conducteurs y compris le deuxième sont au potentiel zéro (1).

Remarque. — La considération des perméances et des réluctances permet, dans certains cas, de déterminer simplement les formules donnant les capacités : de plus, les formules qui donnent les réluctances sont analogues à celles qui donnent les résistances ou les conductances du milieu. On pourrait donc déduire les unes lorsqu'on connaît les formules donnant les autres.

Observations de M. Liénard.

M. ILIOVICI a montré comment on pouvait relier la notion des coefficients de capacité à celle des perméances des tubes de force allant d'un conducteur à un autre ou à l'infini. C'est particulièrement intéressant pour l'enseignement en facilitant la compréhension de cette notion assez abstraite de coefficient de capacité. Mais la correspondance n'est pas absolument générale et des précisions sont nécessaires. Il me suffira de considérer le cas de deux conducteurs.

(1) Dans notre « Note » du 16 mars 1929 devant la 6^e section, nous avons admis que dans tous les cas il existe des tubes de force qui relient chaque conducteur à l'infini (ou à l'enveloppe) et aux autres conducteurs. mais, à la suite des remarques de M. Liénard, qu'on lira plus loin, nous nous sommes limité aux deux cas particuliers que nous venons d'étudier.

I. — Supposons les potentiels V_1 et V_2 des conducteurs égaux et positifs pour fixer les idées. Alors la formule générale de M. ILIOVICI.

$$Q_i = C_i V_i + \sum_m C_{im} (V_i - V_m) \quad (1)$$

donne :

$$Q_1 = C_1 V_1, \quad Q_2 = C_2 V_2 = C_2 V_1.$$

Aucune ligne de force ne peut relier les conducteurs qui sont au même potentiel. Toutes les lignes de force partent de l'un ou l'autre conducteur pour aller à l'infini. La somme des charges élémentaires correspondant à tous les tubes partant d'un conducteur pour aller à l'infini est égale à la charge totale du conducteur, et la propriété signalée par M. ILIOVICI est bien vérifiée.

II. — Il en est encore de même si l'on suppose qu'un seul des conducteurs ait un potentiel non nul, le second (ou tous les autres, s'il y en a plus de deux) étant au potentiel zéro. Soit par exemple :

$$V_1 > 0, \quad V_2 = 0.$$

La formule (1) donne :

$$Q_1 = C_{11} V_1 + C_{12} V_2, \quad Q_2 = -C_{12} V_1.$$

Aucune ligne de force ne peut aller du conducteur 2 à l'infini qui est au même potentiel.

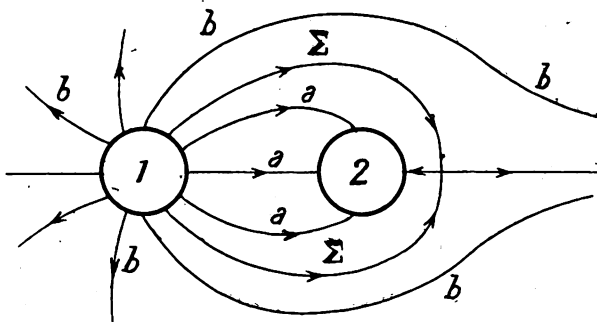


Fig. 4.

Toutes les lignes de force partent du conducteur 1 pour aboutir soit à 2 (lignes a intérieures à une certaine surface Σ), soit à l'infini (lignes b extérieures à Σ).

Puisqu'en tous les points de 2 aboutissent les lignes de force a venant d'un conducteur à potentiel plus élevé, la densité électrique est négative et non nulle en n'importe quel point de ce conducteur. Quant au conducteur 1, la densité γ est partout positive, la partie de la charge totale de 1 correspondant aux tubes a étant égale et de signe

contraire à la charge de 2 et égale par suite à $C_{12}V_1$, tandis que la partie de la charge correspondant aux tubes b est égale, par différence, à C_1V_1 . Ici encore les coefficients C_1 et C_{12} sont respectivement proportionnels aux perméances de l'ensemble des tubes b et a .

III. — Mais supposons maintenant V_2 non nul, mais très petit, V_1 étant toujours positif. Si V_2 est assez petit, la densité électrique qui était négative (et non nulle) en tous les points du conducteur 2 reste encore négative. Il n'y a encore aucun tube de force allant du conducteur 2 à l'infini et nous n'aurons encore que des tubes de force tels que a allant de 1 à 2 et tels que b allant de 1 à l'infini. Or, la formule (1) donne cette fois les relations :

$$Q_1 = C_1V_1 + C_{12}(V_1 - V_2), \quad Q_2 = C_2V_2 + C_{12}(V_2 - V_1),$$

contenant les trois coefficients C_1 , C_{12} et C_2 qu'il est évidemment impossible d'exprimer au moyen des deux seules perméances des tubes a et b .

IV. — On ferait un raisonnement analogue en supposant que V_2 , au lieu d'être voisin de zéro, est voisin de V_1 . Ici encore les trois coefficients de capacité interviendraient alors qu'il n'y aurait encore que deux catégories de tubes (allant toutes deux de 1 ou de 2 à l'infini, comme dans 1).

VUES MODERNES SUR L'ELECTROSTATIQUE ⁽¹⁾

Par M. CHAUMAT

Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers.

Préambule. — Quelques faits dominants. — Différences et analogies entre le magnétisme et l'électricité. — Machines électrostatiques. — Expériences.

PRÉAMBULE

Il est un fait frappant : c'est l'ignorance où nous sommes du fonctionnement des machines électrostatiques.

Dans le calcul des machines dynamos à courant continu, des alternateurs, des transformateurs, on va du connu à l'inconnu. On part de lois fondamentales bien établies : loi d'Ohm, lois des circuits électriques, loi du circuit magnétique, et l'on peut développer les calculs, faire des avant-projets ; on sait prévoir les pertes des machines, calculer le rendement : les essais à la plate-forme confirment les prévisions.

Dans le domaine de l'électrostatique, au contraire, il semble que, par un grave attentat à la logique, on ait toujours procédé en sens inverse. Dans toutes les machines électrostatiques, que ce soit des machines à frottement ou des machines dites « à influence », il y a toujours, au moins au début, pour l'amorçage, un développement d'électricité par le frottement. Or, il n'y a rien de plus mystérieux et de plus mal connu encore, dans l'état actuel de la science, que le développement de l'électricité par frottement : il en résulte évidemment que, dans la réalisation des machines électrostatiques, l'empirisme va régner en maître. C'est par routine, et par suite de progrès très lentement réalisés, qu'on est arrivé à mettre, ici, une fenêtre, là, une languette de carton, ailleurs, un petit pinceau conducteur, sans trop savoir pourquoi : *les machines électrostatiques ne sont pas calculées.*

Or, si l'on envisage une machine électrostatique (par exemple, une des meilleures réalisées : la machine de Whimshurst) en plein débit, tournant à vitesse constante dans une atmosphère sèche, on ne peut pas ne pas être frappé du rythme régulier des étincelles. On est en

(1) Cette communication présentée en séance publique le 10 avril 1929 sera discutée le mercredi 23 octobre 1929.

présence d'un phénomène parfaitement fini et bien déterminé. Ceci doit pouvoir *se prévoir*. Quand on fait, non pas la théorie de cette machine, mais une ébauche de théorie, on arrive à prévoir qualitativement ce que l'on a appelé *l'effet de multiplication*, mais on est loin de le calculer. Il suffit, dit-on, d'une trace d'électricité initiale pour comprendre le mécanisme. En réalité, *on multiplie une quantité indéterminée par un facteur inconnu*. Il n'est pas possible d'étaler plus complètement l'ignorance où l'on est du fonctionnement de ces machines.

Cette sorte de stagnation de cette branche de la science électrique appliquée tient, sans doute, à de multiples causes : à l'existence de mauvaises machines, à de mauvaises expériences, à des formes surannées d'appareils, et, sans doute aussi, à de mauvaises habitudes de langage. Nous avons nous, les professeurs, à faire un grand « *mea culpa* ». Dans mon domaine, et, en particulier dans mon enseignement au Conservatoire National des Arts et Métiers, je me suis efforcé de clarifier tous les points obscurs, et peut-être est-il permis d'entrevoir le jour prochain où l'on pourra calculer une machine électrostatique comme on calcule un alternateur.

C'est pour toutes ces raisons que, après avoir montré quelques expériences et développé certaines idées devant quelques professeurs des lycées de Paris, j'ai tenu à ce qu'on les invitât tout particulièrement ce soir. Je les remercie bien vivement d'être venus m'apporter leur concours pour l'œuvre que j'entreprends.

J'adresse également mes très vifs remerciements à M. Paul CLEMENCEAU toujours si admirablement jeune et curieux d'esprit, qui a été, on le sait dans nos milieux, l'un des plus actifs collaborateurs de mon illustre prédécesseur au Conservatoire, Marcel DEPREZ. Peut-être est-il venu, ce soir, pour assister aux premiers balbutiements d'une technique qui se cherche.

Je tiens également à remercier très vivement le Ministre de la Guerre, M. Paul PAINLEVÉ, d'avoir laissé, pour un instant, les impérieux devoirs de sa charge pour m'entendre. L'illustre savant qu'il est, ancien président de l'Académie des Sciences, a voulu se tenir au courant d'une tentative scientifique dont il avait connu le début.

QUELQUES FAITS DOMINANTS.

Quelques faits et quelques théorèmes dominant le développement de l'électricité dans les phénomènes dits « électrostatiques » et régissent ces phénomènes.

Il y a deux électricités : c'est là un fait d'expérience inattaquable, immortel. Quelles que soient les théories, quels que soient les progrès de la science il y aura toujours deux espèces d'électricité, il n'y en aura jamais que deux, autant, du moins, que les natures d'électricité resteront définies comme elles le sont : par l'expérience.

Les deux électricités apparaissent toujours en quantités égales. Il ne saurait donc y avoir de machines électrostatiques qu'avec deux pôles : un pôle positif, un pôle négatif. C'est une grave faute d'avoir construit et répandu des machines dites « unipolaires », avec un seul pôle apparent. Cela donne des idées fausses, cela empêche de voir clair et de songer à l'autre électricité, toujours présente et souvent très proche.

Le théorème des éléments correspondants nous enseigne qu'il n'est pas de tube de force émané d'une surface conductrice électrisée positivement qui n'aboutisse à une surface chargée négativement.

Les surfaces conductrices qui sont à l'origine et à l'aboutissement d'un tube de force possèdent, on le sait, des charges égales et de signes contraires.

Alors, pourquoi parler de la charge d'un corps isolé ? Cela n'a pas de sens. Quand un professeur parle et dit : « Je considère un corps chargé positivement isolé dans l'espace », ce n'est là qu'une abstraction. Il fait partie, lui, de l'enceinte conductrice, et il a, au bout de la langue, l'aboutissement d'un tube de force, un élément de charge, qui lui donne un démenti. Il n'y a jamais que des condensateurs, avec deux armatures, et possédant, sur chacune de ces armatures, deux charges égales en valeur absolue.

« Charger un corps isolé » est également une expression vide de sens. Et c'est, d'ailleurs, une impossibilité expérimentale. La machine de charge produira toujours les deux électricités : l'une ira au corps prétendu isolé par un conducteur volontairement établi, l'autre ira nécessairement sur la deuxième armature du condensateur, c'est-à-dire sur l'enceinte qui recueille *tous* les tubes de force. Cette enceinte se chargera, tout comme le corps isolé, *et aussi bien*, soit que l'on ait établi volontairement une liaison conductrice, soit que la charge de l'enceinte trouve son cheminement par une voie de fortune, au gré de la conductivité des matériaux trouvés sur le passage.

Parler de la capacité d'un *corps conducteur isolé* est encore une expression vide de sens. La capacité d'une *sphère supposée isolée dans l'espace* est numériquement égale à son rayon. C'est là une expression mathématique limite. Pour quelqu'un qui désire associer étroitement

la théorie et l'expérience, en oubliant l'enceinte, on s'expose à de graves erreurs.

Par exemple, la capacité d'une sphère de 1 mètre de rayon, située au centre d'une enceinte de 5 mètres de rayon est égale à 125 unités électrostatiques C. G. S. Si on oublie l'enceinte, on trouve seulement 100.

Au lieu de « capacité d'une sphère », on devrait dire « capacité de telle sphère par rapport à telle enceinte ». Et, d'ailleurs, cela représente aussi bien la capacité de l'enceinte par rapport à la sphère.

Chiffrer en microfarads la capacité de la terre est un petit exercice de calcul tout à fait puéril et sans aucun sens ni aucune conséquence physique. On trouve 707 μ F environ. Mais où est l'autre armature ?

On pourrait continuer les petits calculs :

On sait que, dans le voisinage de la surface de la terre, il existe un champ électrostatique dirigé vers le haut, que nous admettrons être, en valeur moyenne, de 200 volts par mètre environ. Le théorème de Coulomb nous permettrait de calculer la densité électrostatique superficielle de la charge terrestre et l'on trouverait, pour cette charge, une valeur approximative de 900.000 coulombs. Or, on a toujours la relation :

$$Q = CV.$$

Et pour : $Q = 900.000$ coulombs.

et : $C = 707$ microfarads,

on déduit : $V = 1.273$ millions de volts.

Le potentiel de la terre aurait donc cette valeur. Mais par rapport à quoi ?

L'énergie électrostatique de la terre, qu'il serait possible de mettre en évidence si l'on possédait l'autre armature du condensateur, est d'environ :

$$572 \times 10^{12} \text{ joules.}$$

C'est l'énergie que produirait une usine de 10.000 kilowatts, travaillant pendant 22 mois d'une façon continue, 24 heures par jour.

Que l'on m'amène l'autre armature du condensateur, et nous pourrions faire une belle étincelle ! Ce serait une expérience sensationnelle que la décharge de la terre et cela apporterait la solution de maints problèmes concernant les orages ; les conditions d'existence à la surface du globe seraient changées, quant au champ électrostatique terrestre.

On pourrait continuer, mais il est inutile d'aller plus loin pour montrer l'inanité de ces conceptions et de ces calculs.

LES DIFFÉRENCES ET LES ANALOGIES ENTRE LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRICITÉ

On a souvent dit qu'une différence profonde sépare le magnétisme et l'Electricité. Il est possible, dit-on, d'isoler une charge électrique. Il est, au contraire, impossible de séparer deux masses magnétiques.

Or, nous savons ce qu'il faut penser d'une charge électrique isolée et, à ce point de vue, il y a une très grande analogie entre les deux ordres de phénomènes. Deux masses magnétiques nord et sud équivalentes sont toujours présentes aux extrémités d'un métal magnétique : de même, deux masses électriques, positive et négative, équivalentes,

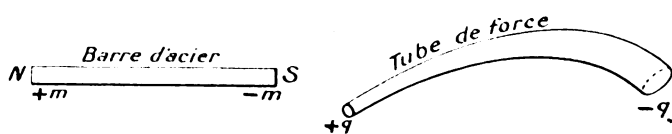


Fig. 1. — Analogie entre l'aimant et le tube de forces électrostatiques.

sont toujours présentes aux extrémités d'un tube de force découpé dans un diélectrique et qui aboutit à deux surfaces conductrices. Il n'y a là, pour le philosophe, aucune différence que dans la rigidité et, plus généralement, dans les propriétés mécaniques du milieu de liaison entre les deux masses ou les deux charges.

Si l'on est bien imbu de cette idée, on peut répéter, avec les phénomènes électrostatiques, des expériences qui ont une grande analogie avec les expériences de magnétisme.

C'est ainsi que j'ai pu présenter, à mon cours du Conservatoire, une sorte d'aimant électrostatique avec lequel on peut soulever des lames de bois ou d'un diélectrique quelconque ou même des lames métalliques. Cet aimant électrostatique présente des phénomènes de rémanence qui ont une singulière ressemblance avec les phénomènes magnétiques bien connus. Et, d'ailleurs, la force portante se calcule exactement comme la force portante d'un aimant ou d'un électro-aimant.

MACHINES ÉLECTROSTATIQUES

Nous laisserons de côté les machines dite « à frottement », dont le rendement est forcément très faible, une grande partie de l'énergie dépensée étant absorbée par le frottement et rayonnée, sous forme de chaleur, dans le milieu ambiant.

Nous ne retiendrons qu'une catégorie de machines que l'on pourrait rattacher aux machines dites « à influence » mais nous en aborderons la théorie générale avec un peu de logique : en nous inspirant de tout ce qui précède et en invoquant, tout d'abord, le théorème fondamental sur les déformations des corps isolés. Ce théorème est le suivant :

« Quand un système électrisé quelconque se déforme, s'il est isolé, sa charge totale est constante.

Dans ce théorème, formulé par Lippmann sous le nom de « Principe de la conservation de l'électricité » ce mot de charge doit être entendu dans le sens de « Somme algébrique des charges ». Si l'on voulait appliquer ce théorème à un condensateur, puisqu'il n'y a jamais que des condensateurs, il faudrait modifier cet énoncé et dire que la charge totale est toujours nulle. Ceci serait, d'ailleurs, sans intérêt.

Mais nous pourrions appliquer ce théorème à l'une des armatures du condensateur, qui est isolée de l'autre armature ; en appelant *charge du condensateur* suivant la terminologie habituelle, la valeur absolue de la charge commune à chaque armature.

Ceci dit, considérons un condensateur chargé et isolé de la source ; il possède une énergie :

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}.$$

Si ce système reste isolé de la source et se déforme à charge constante, la capacité varie. Donc, *l'énergie varie, et il y a là une machine.*

Si la capacité *diminue*, l'énergie électrique croît et le système doit nécessairement absorber de l'énergie mécanique : nous aurons une *génératrice*.

Si la capacité *augmente*, nous aurons affaire à un *moteur* qui produira de l'énergie mécanique aux dépens de son énergie électrique, qui va diminuer.

On voit de suite par quel mécanisme l'énergie mécanique entre en jeu. Dans la génératrice, pour faire diminuer la capacité, il faudra écarter les deux armatures du condensateur et dépenser, pour cela, du travail, puisque ces deux armatures possèdent des charges de signes différents qui s'attirent.

Le mécanisme du moteur est identique, au signe près.

On voit également la possibilité de réaliser des machines, au sens usuel du mot, en construisant, suivant des modes que l'on peut faire varier à l'infini, des systèmes tournants, dont la capacité variera, en fonction du temps, suivant les formes choisies. De tels systèmes sont évidemment réversibles.

On peut se demander ce qu'il adviendrait si les condensateurs étaient immobiles et si l'on en faisait varier la capacité en fonction du temps, à l'aide de commutateurs tournants, par le jeu des connexions. Ici, à coup sûr, il n'y a pas mise en jeu d'énergie mécanique dans un sens ou dans l'autre. Il n'y a ni génératrice, ni moteur. On peut être certain que l'énergie se conserve (au rendement près) et que c'est la charge qui varie. Nous aurons là des *transformateurs*. C'est à ce type d'appareil que se rattache la vieille machine, dite *rhéostatique*, de GASTON PLANTÉ.

Revenons aux vraies machines, et prenons le cas d'une génératrice.

En même temps que la capacité diminue, la charge restant constante, la différence de potentiel croît.

Nous pourrions toujours, par le choix des formes, faire varier la capacité, en fonction du temps, suivant une loi quelconque fixée *a priori*. Nous aurons donc une génératrice, qui développera, entre ses bornes, une *tension variable, en fonction du temps, suivant une loi quelconque fixée a priori*.

Il serait possible de réaliser une génératrice donnant, entre ses bornes, une tension alternative, monophasée, biphasée, triphasée ou polyphasée. On peut concevoir des formes de tension nouvelles, tout à fait inconnues, qu'il paraît à peu près impossible de réaliser par des moyens électro-magnétiques, et dont les propriétés, déterminées par le calcul et l'expérience, pourraient être riches d'applications.

On peut d'ailleurs, également, faire du continu. J'ai, dans mes cartons, un avant-projet d'une machine de 2 kW qui n'est pas tellement volumineuse, et que j'espère bien présenter, quelque jour, à la Société Française des Electriciens.

On peut se demander si de grandes puissances peuvent être abordées. Il nous manque, évidemment, l'équivalent du fer, et nous ne connaissons pas de matière ayant un pouvoir inducteur spécifique de l'ordre de grandeur du coefficient de perméabilité des métaux magnétiques.

Mais, il n'est pas interdit d'espérer des découvertes dans cet ordre d'idées, et, déjà, l'on peut songer à utiliser le pouvoir inducteur spécifique élevé de la glace.

Quel peut être l'avenir des machines électrostatiques ?

On voit déjà qu'on sera toujours gêné pour le débit ; mais, dans tous les cas où l'on a besoin d'une tension élevée et où un débit assez faible suffit, la machine électrostatique est tout indiquée, par exemple, pour la fabrication de l'ozone, les applications à l'électro-culture, les usages médicaux, la précipitation des poussières, etc., etc...

Mais il faut que les machines puissent être *pré calculées*, pour un objet bien déterminé.

J'espère qu'un avenir prochain justifiera mes prétentions.

J'ai le devoir en terminant, d'adresser mes très vifs remerciements à mon équipe du Conservatoire qui est venue m'assister aujourd'hui, au grand complet, et tout particulièrement à son chef, M. Edouard Lefrand, mon savant collaborateur et ami, l'as des as en matière de réalisation expérimentale et, naturellement, ancien élève de l'Ecole Supérieure d'électricité.

EXPÉRIENCES.

Voici maintenant la description de quelques expériences d'électrostatique réalisées au cours de la séance, quelques unes sous une tension faible, et qui peuvent avoir un assez grand intérêt pédagogique :

Expérience préliminaire.

1. — On charge un conducteur à plateaux sous 110 V et, à l'aide du pendule électrique à balle de sureau, employé sous la forme classique, on montre qu'il y a deux électricités. L'inversion des connexions de la pile de charge ajoute quelque intérêt à l'expérience.

2. — On a pu, avec un aimant réalisé comme ci-contre soulever une plaque de bois de 195 gr., en alimentant l'électro-aimant par une machine de Whimshurst de modèle moyen.

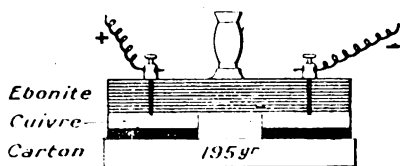


Fig. 2. — Aimant électrostatique.

On a pu, avec cet aimant électrostatique, soulever également, après interposition de carton ou de verre, des lames métalliques de poids variables, et montrer une sorte de rémanent qui disparaît bientôt.

On a pu réaliser cette expérience sous 110 V mais, bien entendu, pour soulever une légère feuille de papier, et avec un appareil spécialement étudié. Cette expérience, sous 110 V, est assez intéressante, étant

donné la façon dont varie la force portante avec la différence de potentiel.

3. — On a pu matérialiser très facilement le champ électrostatique :

- a) Entre deux conducteurs plans situés dans un même plan.
- b) Entre deux plans rectangulaires.
- c) Entre un plan vertical et une sphère.

On a mis, sur les corps conducteurs, une râpure de moelle de sureau. Les petits fragments se chargent, vont d'un conducteur à l'autre,

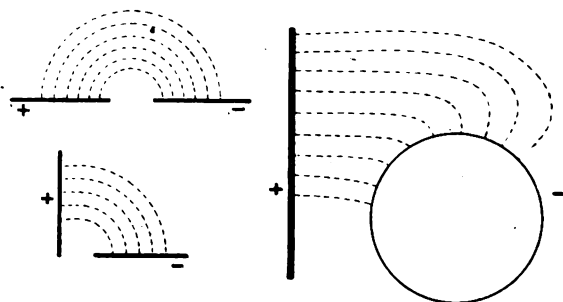


Fig. 3. — Réalisations matérielles du champ électrostatique.

reviennent, et tracent, dans l'espace, les lignes de force électrostatiques. En éclairant les appareils par un arc électrique puissant, l'expérience est particulièrement brillante.

4. — On a fait les expériences classiques de l'influence électrique : A l'aide de l'électroscope chargé et du plan d'épreuve, en soumettant

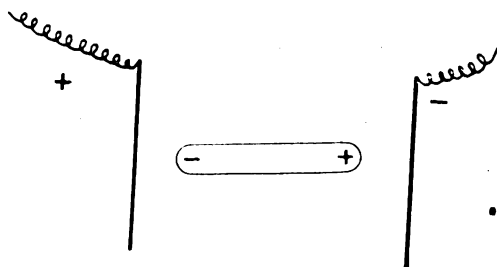


Fig. 4. — Influence électrostatique.

à l'influence un corps allongé placé dans un champ bien défini créé entre deux plateaux conducteurs. Sous cette forme, l'expérience est incomparablement plus nette que sous la forme ordinaire

5. — En disposant deux plateaux verticaux, comme il est indiqué fig. 5, et plaçant un cylindre conducteur mobile autour d'un axe vertical, on a pu réaliser un véritable petit moteur électrostatique, à la condition de disposer les choses, à l'origine, dans une position con-

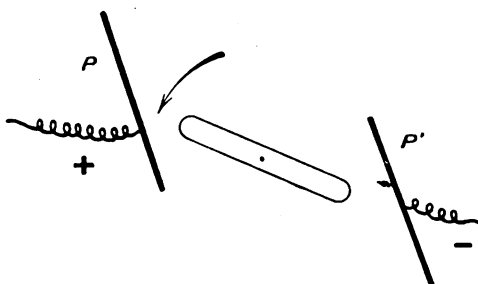


Fig. 5. — Moteur électrostatique.

venable. Quand le conducteur, dans son mouvement, est au plus près des plateaux, ceux-ci se déchargent et, en vertu de la vitesse acquise, la rotation peut continuer. Cette expérience est due à Edouard Lefrand.

6. — Enfin, un groupe d'expériences montrent les variations de tension quand le système électrisé se déforme à charge constante.

a) On charge un conducteur à plateaux sous 110 V. Les plateaux sont, tout d'abord, au contact, et le diélectrique est seulement la double épaisseur du vernis. La charge faite, on isole de la source et on place les plateaux, rapidement, dans la position II. On peut faire

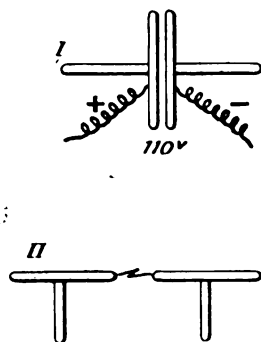


Fig. 6. — Variation de tension par déformation d'un système électrisé.

éclater une étincelle, qui décèle une différence de potentiel de l'ordre de 15 à 20.000 V. La capacité a diminué, et la différence de potentiel a pris cette valeur élevée.

b) Voici, peut-être, l'expérience la plus saisissante. C est un condensateur dont on peut faire varier l'épaisseur du diélectrique en écartant les plateaux à la main. Il est relié, armature à armature, à deux autres

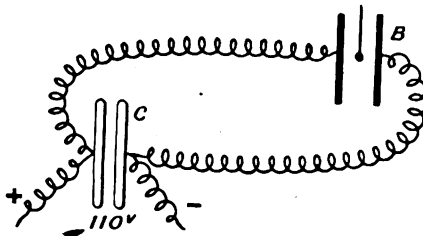


Fig. 7. — Influence de la variation de la tension sur l'attraction d'un pendule.

plateaux situés en B, et entre lesquels se trouve un petit pendule, placé un peu dissymétriquement. On charge l'ensemble sous 110 V, les deux plateaux C étant, tout d'abord, presque au contact. On isole de la source, et on augmente la distance entre les deux plateaux C. La capacité diminue, la tension monte, le champ en B croît et le pendule oscille. On peut l'arrêter en rapprochant de nouveau les plateaux C, et ainsi de suite, tant que la charge se maintient.

7. — Enfin, a réalisé quelques expériences très simples, qu'il suffit de mentionner :

a) Le carillon électrique, avec une grosse boule d'aluminium (de 15 cm de diamètre), oscillant entre les pôles de la machine de Whims-hurst.



Fig. 8. — Electrification par chocs.

b) On a chargé un conducteur sous 110 V, et, en séparant les plateaux, une feuille de papier placée sur l'un d'eux se détache et s'envole, car la tension a monté.

c) Il est très facile de montrer l'électrification par chocs, en prenant comme indicateur un appareil plus sensible que la pendule, et formé par une lame de carton légèrement incurvée et mobile sur un pivot.

DISPOSITIFS DE CONDENSATEURS ET INDUCTANCES ANALOGUES A CELLES DE BOUCHEROT

Par M. BUNET.

Les montages classiques de Boucherot sont donnés par les figures 1 et 2.

Prenons celui de la figure 1; pour passer à celui de la figure 2, il suffira de remplacer dans les résultats $L\omega$ par $\frac{-1}{C\omega}$ et, réciproquement, en valeurs avec imaginaires, et sans signe — en valeurs efficaces.

On a immédiatement :

$$I_1 = U \frac{1}{-\frac{j}{C\omega} + \frac{jZL\omega}{Z + jL\omega}} = \frac{U(Z + jL\omega)C\omega}{L\omega + jZ(\omega^2 LC - 1)},$$

$$U_c = -j \frac{I_1}{C\omega},$$

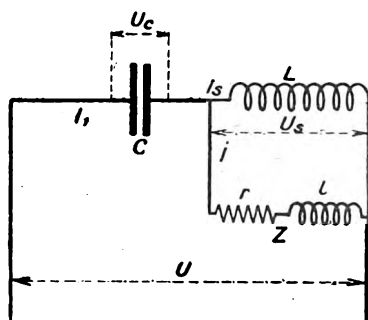


Fig. 1.

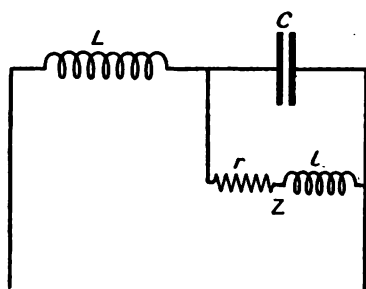


Fig. 2.

$$U_L = \frac{jZL\omega}{Z + jL\omega} I_1 = \frac{jUZ\omega^2 LC}{L\omega + jZ(\omega^2 LC - 1)},$$

$$I = \frac{jU\omega^2 LC}{L\omega + jZ(\omega^2 LC - 1)}.$$

(1) Ce rapport présenté à la 6^e Section le 23 février 1929, sera discuté à la Semaine d'octobre le Samedi 26 octobre 1929.

L'impédance Z se compose d'une résistance r et d'une réactance $l\omega$, et $Z = r + j l \omega$.

Boucherot a indiqué depuis longtemps que si $\omega^2 ZC = 1$, on a :

$$I = j \frac{U}{L\omega} = jUC\omega,$$

c'est-à-dire que le courant I est constant si U est constant; de là résulte la possibilité de transformer une tension constante en un courant constant ou inversement. On voit facilement que pour obtenir, avec U constant, I indépendant de Z il n'y a qu'une solution de $\omega^2 LC = k$, c'est $k = 1$.

Dans ce cas de $\omega^2 LC = 1$, le courant I est en quadrature avec la tension U . Ce qui précède est exact quel que soit Z , et par conséquent la part de la résistance et la réactance dans sa composition.

Un autre cas remarquable est celui de $\omega^2 LC = 2$, et nous ne pensons pas qu'il ait été mentionné. On a alors :

$$I_1 = \frac{Z + jL\omega}{L\omega + jZ} UC\omega = \frac{2rL\omega + j[(L^2 - l^2)\omega^2 - r^2]}{(L - l)^2\omega^2 + r^2} UC\omega.$$

Donc I est déphasé sur U , de façon variable et d'un angle φ en avant donné par

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(L^2 - l^2)\omega^2 - r^2}{2rL\omega}.$$

On tire la valeur efficace :

$$I_{1 \text{ eff.}} = \frac{\sqrt{4r^2 L^2 \omega^2 + (L^2 - l^2)^2 \omega^4 - 2(L^2 - l^2)\omega^2 r^2}}{(L - l)^2 \omega^2 + r^2} UC\omega.$$

Pour que $I_{1 \text{ eff.}}$ soit indépendant de r , il faut que l'on ait sous le radical le carré du dénominateur; de là $l = 0$ et alors :

$$I_{1 \text{ eff.}} = UC\omega = \frac{2U}{L\omega}.$$

Le courant absorbé au réseau est alors indépendant de la résistance qui doit être pure sans réactance.

Le déphasage est donné par :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L^2 \omega^2 - r^2}{2rL\omega},$$

$$\cos \varphi = \frac{2rL\omega}{r^2 + L^2 \omega^2}.$$

On voit facilement que pour obtenir $I_{1 \text{ eff.}}$ indépendant de Z , il est nécessaire dans $\omega^2 LC = k$ de faire $k = 2$ et aussi $l = 0$, et qu'il n'y a que cette solution pour la valeur de $k = 2$.

En revenant un instant au cas général de $\omega^2 LC$ quelconque, les valeurs de I et I_1 efficaces, dans le cas de $l = 0$, sont données par :

$$I_{\text{eff.}} = U\omega^2 LC \frac{1}{\sqrt{L^2\omega^2 + r^2(\omega^2 LC - 1)}},$$

$$I_{1 \text{ eff.}} = UC\omega \frac{\sqrt{r^2 L^4 C^2 \omega^6 + [L^2\omega^2 - r^2(\omega^2 LC - 1)]^2}}{L^2\omega^2 + r^2(\omega^2 LC - 1)},$$

et on peut tirer de là également les conclusions données ci-dessus.

Résumé du cas de $\omega^2 LC = 2$ et $l = 0$. — Valeurs efficaces, Courant de la ligne :

$$I_1 = \frac{2U}{L\omega}.$$

Courant dans la résistance :

$$I = \frac{2U}{\sqrt{r^2 + L^2\omega^2}}.$$

Courant dans la bobine :

$$I_s = \frac{2U}{\sqrt{r^2 + L^2\omega^2}} \frac{r}{L\omega}.$$

Déphasage avant du courant de ligne angle φ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lg \varphi = \frac{L^2\omega^2 - r^2}{2rL\omega}, \\ \cos \varphi = \frac{2rL\omega}{r^2 + L^2\omega^2}. \end{array} \right.$$

Puissance apparente absorbée à la ligne :

$$\frac{2U^2}{L\omega} = U^2 C\omega \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Indépendantes de } r. \end{array} \right.$$

Puissance réactive du condensateur : $U^2 C\omega$

Puissance active :

$$rI^2 = \frac{2U^2}{L\omega} \cos \varphi = 4U^2 \frac{r}{r^2 + L^2\omega^2}.$$

Puissance active maximum (pour $r = L\omega$) :

$$\frac{2U^2}{L\omega} = U^2 C\omega \quad \text{avec} \quad \cos \varphi = 1.$$

Tension aux bornes du condensateur $U_c = U$.

Tension aux bornes de la résistance et la bobine :

$$U_s = 2U \frac{r}{\sqrt{r^2 + L^2\omega^2}};$$

cette dernière tension varie selon le tableau ci-après :

$r : L\omega$	$U_s : U$
0	0
$1 : \sqrt{3}$	1
1	$\sqrt{2} = 1,41$
2	$\frac{2}{\sqrt{1,25}} = 1,79$
3	$\frac{2}{\sqrt{1,11}} = 1,90$
4	$\frac{2}{\sqrt{1,0625}} = 1,94$
∞	2

Cas de $\omega^2 LC = 2$ et l différent de zéro. — Dans ce cas le courant I_1 absorbé à la ligne n'est plus constant. La figure 3 montre sa variation. On a pris $U = 100$ volts, un condensateur de $\frac{1}{C\omega} = 0,5$ ohm,

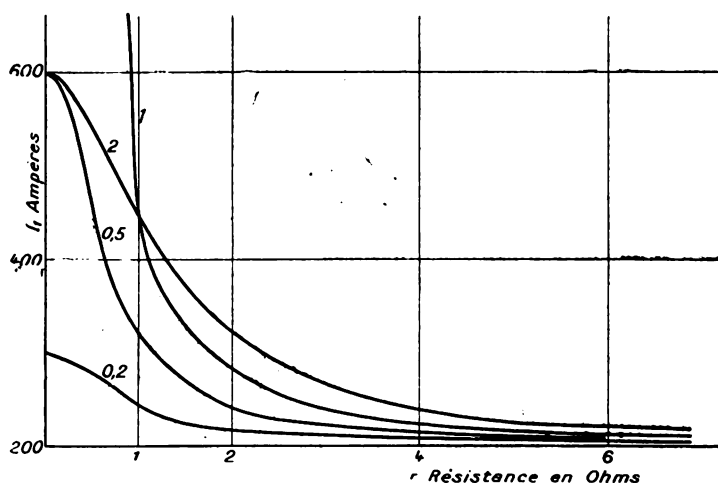


Fig. 3. — Courant absorbé à la ligne pour une résistance variable du circuit d'utilisation et diverses valeurs de la réactance de ce circuit.

Tension $U = 100$ V.

Réactance de la bobine : 1 ohm.

Réactance du condensateur : 2 ohms.

une bobine de $L\omega = 1$ ohm. On a donné successivement à $L\omega$ les valeurs 0,2 — 0,5 — 1 — 2 ohms indiquées sur chacune des courbes. Si la résistance r est sensiblement plus grande que la résistance $L\omega$, le courant de la ligne I_1 demeure peu variable.

Le cas de $l\omega = 1$ ohm, ou en général de $l\omega = L\omega = \frac{2}{C\omega}$ est remarquable, car pour $r = 0$, I_1 , n'est plus limité mais tend vers l'infini. En effet, la bobine d'inductance L et, en dérivation, celle d'inductance l , équivalent à $\frac{L\omega}{2}$ qui entre en résonance directe avec $\frac{2}{C\omega}$.

Diagrammes dans le cas de $\omega^2 LC = k$ et $l = 0$. — Ce diagramme est donné par la figure 4.

On a ;

$$\begin{aligned} U^2 &= U_c^2 + U_s^2 - 2U_c U_s \sin \alpha, \\ \sin \alpha &= \frac{I_s}{I_c} = \frac{U_s}{L\omega} \frac{1}{U_c C\omega} = \frac{U_s}{U_c} \frac{1}{k}. \end{aligned}$$

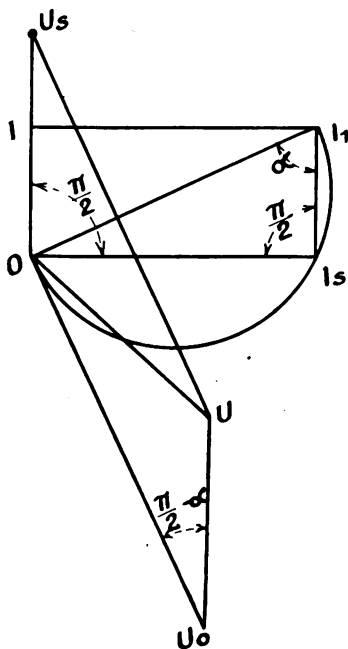


Fig. 4.

1° Si $\omega^2 LC = 1$ on obtient :

$$U^2 = U_c^2 - U_s^2.$$

On tire d'ailleurs aussi de ce qui précède :

$$U_c^2 = U^2 \frac{r^2 + L^2 \omega^2}{L^2 \omega^2},$$

$$U_s^2 = U^2 \frac{r^2}{L^2 \omega^2},$$

ce qui donne la même différence que ci-dessus, et toujours :

$$I = \frac{U_s}{r} = \frac{U}{L\omega}.$$

2° Si $\omega^2 LC = 2$:

$$U = U_c,$$

$$I_1 = U_c C \omega = U C \omega = \frac{2U}{L\omega}.$$

On peut aussi, selon la figure 5, voir que, dans ce même cas de $k = 2$ et $l = 0$, pour obtenir $I_1 = \text{constante}$ avec r variable, il faut déplacer U selon une demi-circonférence. Le point A correspond

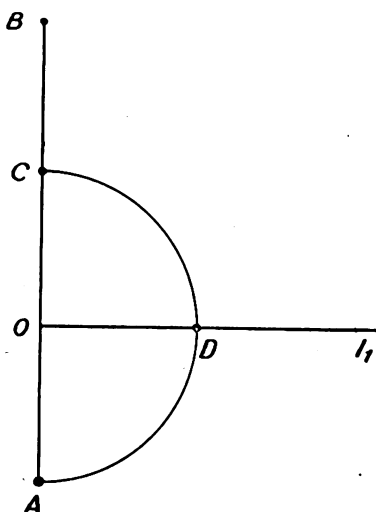


Fig. 5.

à la tension aux bornes du condensateur dans tous les cas, et à la tension U dans le cas de $r = 0$; le point B correspond à la tension aux bornes de la bobine quand $r = \infty$; le point C donne la tension de la ligne aussi pour $r = \infty$; le point D de déphasage nul correspond à $r = L\omega$.

Problème traité par les considérations de puissances active et réactive, selon M. Boucherot. — Dans ce cas de $\omega^2 LC = 2$, on a la figure 6. U_L et I dans le circuit d'utilisation déterminent une puissance active P et une puissance réactive Π . On a :

$$\begin{aligned}
 U^2 I_1^2 &= P^2 + \left(\Pi + \frac{U_s^2}{L\omega} - \frac{\omega L}{2} I_1^2 \right)^2 \\
 &= P^2 + \left(\Pi + \frac{U_s^2}{L\omega} \right)^2 + \frac{\omega^2 L^2}{4} I_1^4 - 2 \left(\Pi + \frac{U_s^2}{L\omega} \right) \frac{\omega L}{2} I_1^2.
 \end{aligned}$$

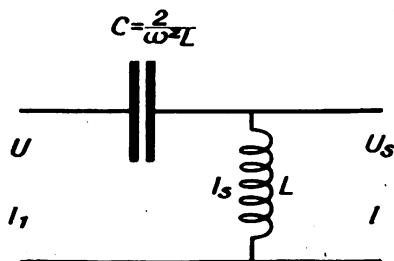


Fig. 6.

Les deux premiers termes correspondent à la puissance apparente $U_s I_1$; d'où :

$$\begin{aligned}
 U^2 I_1^2 &= U_s^2 I_1^2 + \frac{\omega^2 L^2}{4} I_1^4 - 2 \left(\Pi + \frac{U_s^2}{L\omega} \right) \frac{\omega L}{2} I_1^2, \\
 U^2 &= U_s^2 + \frac{\omega^2 L}{4} I_1^2 - 2 \left(\Pi + \frac{U_s^2}{L\omega} \right) \frac{\omega L}{2} = \frac{\omega^2 L}{4} I_1^2 - \Pi \omega L
 \end{aligned}$$

et :

$$I_1 = \frac{2}{\omega L} \sqrt{U^2 + \Pi \omega L}.$$

On voit ainsi très facilement et sous une forme très claire que pour que I_1 soit indépendant de la composition du circuit d'utilisation comprenant la résistance r et l'inductance l , il faut et il suffit que $\Pi = 0$, c'est-à-dire que ce circuit n'absorbe aucune puissance réactive.

Remarque. — On peut traiter le problème avec les valeurs instantanées portées sur la figure 7, comme l'a fait Boucherot :

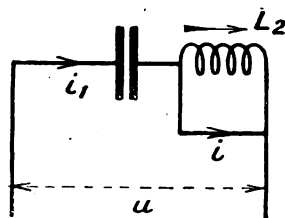


Fig. 7.

$$\begin{aligned}
 i_1 &= i_2 + i, \\
 u &= L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt = L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + \frac{1}{C} \int i_2 dt.
 \end{aligned}$$

Dans ce cas de fonctions sinusoïdales, les dérivées et les intégrales sont égales, sauf le signe et l'introduction de ω^2 .

$$u = \left(L - \frac{1}{\omega^2 C} \right) \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{\omega^2 C} \frac{di}{dt}.$$

1° Si $\omega^2 LC = 1$:

$$u = - \frac{1}{\omega^2 C} \frac{di}{dt} = - L \frac{di}{dt};$$

donc le courant i est indépendant de l'impédance du circuit qu'il traverse et il est toujours en quadrature avec u .

2° Si $\omega^2 LC = 2$:

$$u = \frac{L}{2} \frac{d(i_2 - i)}{dt}.$$

On a donc la même conclusion en ce qui concerne, non plus i , mais la différence de i_2 et i_1 . Ceci ne s'applique plus, bien entendu, aux différences des valeurs efficaces ; on ne peut tirer de là i_1 et i_2 , sans continuer un calcul assez long et inutile étant donné que les méthodes déjà exposées, plus simples, suffisent.

REMARQUE. — Dans le cas de la figure 2, les propriétés ci-dessus de $\omega^2 LC = 2$ se retrouvent avec $\omega^2 LC = \frac{1}{2}$.

PROJET DE CLAUSES TECHNIQUES
D'UN CAHIER DES CHARGES POUR LA FOURNITURE
DES CONDENSATEURS DESTINÉS
A L'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE ⁽¹⁾

par M. de la GORCE.

A. — *Epreuves de rigidité diélectrique.*

Un condensateur destiné à fonctionner normalement sous une tension efficace U de fréquence F devra pouvoir supporter pendant 1 minute, sans incident :

1° Entre l'ensemble des armatures et la cuve (ou bâti) une tension alternative de fréquence F et de valeur efficace égale à $2U + 2\,000$ volts.

2° Entre les deux armatures du condensateur une tension continue égale à $2U + 500$ volts, si $U < 250$ volts et égale à $4U$, si $U > 250$ volts.

B. — *Limites de précision (mesure de la capacité).*

On mesurera de préférence la capacité du condensateur par une méthode de pont en courant alternatif de fréquence normale F .

Toutefois le procédé qui utilise une tension continue et un balistique n'est pas exclu.

Si on déduit la capacité de la mesure de la puissance apparente, il est indispensable de s'assurer que la tension appliquée est sinusoïdale.

L'écart entre la capacité indiquée et la capacité mesurée ne devra pas dépasser 5 pour cent.

C. — *Conditions relatives aux pertes diélectriques.*

Aucune méthode n'est imposée pour la détermination des pertes diélectriques. Si on les mesure directement à l'aide d'un wattmètre,

(1) Ce projet sera discuté à la Semaine d'octobre le Samedi 26 octobre 1929.

la sensibilité de l'instrument devra permettre de mesurer 1 watt par kilovoltampère de puissance apparente.

Les pertes diélectriques, sous tension normale et à fréquence normale, ne devront pas dépasser :

6 millièmes de la puissance apparente à la température de 20 degrés C.

et 8 millièmes de la puissance apparente à la température de 50 degrés C.

D. — *Epreuve de surcharge.*

Le condensateur sera mis en circuit pendant 2 heures consécutives sous une tension alternative de fréquence F et de valeur efficace 1,5U.

L'accroissement des pertes diélectriques du commencement à la fin de l'essai ne devra pas dépasser 15 pour cent.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE.
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Note sur les transformateurs téléphoniques (M. CHAVASSE), p. 1190. — Méthodes et appareils de mesure des déséquilibres des câbles téléphoniques (M. DUNAND), p. 1213. — Etude générale sur les bois employés en électrotechnique. Méthode de contrôle-traitement (M. VITTE), p. 1221.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS :

Visite des anciens élèves du Polytechnikum de Zurich à la Maison d'Ampère à Poleymieux, p. 1250.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 1251.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1252.

IL Y A TRENTE ANS, p. 1256.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

NOTE SUR LES TRANSFORMATEURS TÉLÉPHONIQUES ⁽¹⁾

par M. P. CHAVASSE.

Ingénieur des Postes et Télégraphes.

Objet de la communication. — Transformateurs de multiple téléphonie. — Transformateurs pour circuits interurbains (combinaison et appropriation). — Rendement des transformateurs aux fréquences téléphoniques : a) rendement énergétique; b) rendement en voltampères; c) détermination du rendement par mesures d'impédance; d) comparaison de quelques transformateurs. — Fréquence principale de mesure; valeur de l'impédance secondaire; tension primaire. — Rendement aux très basses fréquences : procédé de mesure. — Conditions relatives à l'équilibre et à la diaphonie. — Conclusion.

De nombreux auteurs ont étudié, dans ces dernières années, la technique de la construction et de l'utilisation des transformateurs téléphoniques. Il y a lieu de citer en particulier, parmi les travaux les plus complets sur cette question, une étude de M. CASPER dans le *Journal of the American Institute of electrical engineers* de mars 1927 (Impédance et affaiblissement de service de transformateurs toroïdaux), *La Contribution à la théorie du transformateur téléphonique* par MM. CARVALLO et RENAULT, (Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones, de septembre 1929) et, tout récemment, dans *Telegraphen und Fernsprech-Technik*, de décembre 1928, une étude de MM. FELDT-KELLER et V. GANDTNER, intitulée : *Scheinwiderstand und Betriebsdämpfung von Ringübertragern*.

Parallèlement à ces mémoires, qui apportent à la question du transformateur téléphonique des éléments théoriques et pratiques du plus haut intérêt, de divers côtés ont été entrepris des recherches ayant pour but de préciser les qualités qu'on est en droit de demander à ces transformateurs, et les mesures qu'il est possible et utile de faire sur eux pour s'assurer qu'ils répondent bien au but proposé.

(1) Communication présentée à la 5^e Section de la Société Française des Electriciens, le 15 février 1929.

L'Administration des Postes et des Télégraphes et, plus spécialement, le Service d'Etudes et de Recherches Techniques des P.T.T., ont été conduits à examiner certaines caractéristiques de ces appareils, en vue de déterminer les éléments qui paraissent être les plus importants dans la pratique. L'objet de la présente note est d'indiquer quelques résultats essentiels de ces travaux et de comparer les conclusions qui en ont été tirées avec les spécifications essentielles qui sont imposées à ces appareils par divers Offices étrangers, ou proposées dans les articles précités.

Il peut être utile de rappeler, en premier lieu, dans quelles circonstances principales l'Administration française utilise des transformateurs pour l'équipement de ses circuits urbains (lignes auxiliaires) ou interurbains (lignes aériennes en fil nu), abstraction faite des transformateurs spéciaux normalement en service sur les câbles pupinisés et dans les stations de relais amplificateurs. Les transformateurs auxquels il sera fait allusion dans cette note, seront donc de deux types :

A. — Les transformateurs de multiple téléphonie qui servent à l'alimentation des postes d'abonnés et qui se trouvent placés dans les dicordes ou les monocordes de certains bureaux urbains.

B. — Les transformateurs destinés à la combinaison ou à l'appropriation des circuits téléphoniques et permettant la superposition sur les mêmes circuits du télégraphe et du téléphone ou la réalisation de trois circuits téléphoniques avec quatre fils seulement.

A. — TRANSFORMATEURS DE MULTIPLE TÉLÉPHONIQUE.

Le schéma général (fig. 1) d'une communication téléphonique entre deux abonnés reliés respectivement à deux bureaux différents, équipés

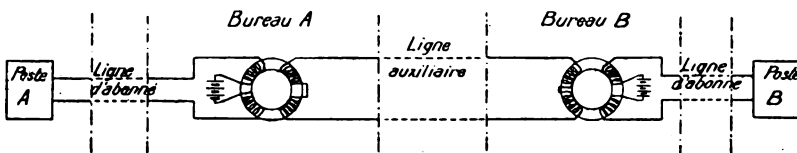


Fig. 1. — Communication téléphonique établie avec transformateurs.

avec des dicordes ou monocordes à translateurs, se compose essentiellement d'un ensemble de deux transformateurs ayant chacun deux demi-enroulements primaires parcourus par le courant continu alimentant

les postes, et leurs enroulements secondaires réunis par une ligne auxiliaire (en câble souterrain).

Le transformateur (ou translateur) du bureau A « de départ » est utilisé pour l'alimentation du poste A ; le poste B reçoit au contraire le courant de la batterie du bureau B à travers un transformateur placé dans ce bureau. Cette disposition a pour but de séparer électriquement la ligne auxiliaire qui relie les deux bureaux des installations individuelles d'abonnés et d'empêcher les terres qui se trouvent toujours à l'un des pôles des batteries centrales des deux bureaux de réagir l'une sur l'autre, ou encore de déséquilibrer les lignes auxiliaires.

L'expérience et la théorie montrent en effet que, si des précautions rigoureuses ne sont pas prises dans l'équilibrage du dispositif d'alimentation des lignes d'abonné par la batterie centrale, des phénomènes perturbateurs (diaphonie, induction de bruits parasites dus aux circuits voisins, effets des terres, etc...), peuvent apparaître et devenir assez importants pour rendre toute communication, sinon impossible, du moins très précaire. Des applications récentes ont mis en évidence que les inconvénients dus aux défauts de symétrie de certains systèmes d'alimentation insuffisamment équilibrés et protégés et consistant dans la production intermittente de bruits parasites, étaient pratiquement supprimés par l'interposition de transformateurs convenablement équilibrés (condition relativement facile à réaliser), et ayant une capacité entre primaire et secondaire faible, eu égard à la capacité linéique moyenne (40 millimicrofarads par km) des conducteurs ordinairement en service dans les réseaux urbains et à la fréquence des courants à transmettre (courants téléphoniques de fréquence comprise entre 200 et 3 000 p : s). Grâce à la petitesse de cette capacité (inférieure à 2 millièmes de microfarads), ainsi d'ailleurs qu'à sa répartition suffisamment exacte entre les groupes de demi-enroulements primaires et secondaires, le transformateur joue le rôle « d'écran électrique » et sépare efficacement les éléments de circuit entre lesquels il est interposé.

On se rend aisément compte que les qualités transmissives des transformateurs de multiple doivent être aussi bonnes que possible de manière à n'introduire que des affaiblissements supplémentaires insignifiants. En revanche, ces transformateurs n'ayant jamais à transmettre de courants d'appel (courants qui sont toujours envoyés ou électromécaniquement retransmis par le bureau local de l'abonné), aucune spécification relative aux courants de très basse fréquence n'est à retenir pour la détermination des caractéristiques fondamentales de ces

appareils et seules sont à considérer les indications se rapportant aux points suivants :

1° Équivalent de transmission suffisamment petit pour les fréquences téléphoniques.

2° Capacité aussi réduite que possible entre primaire et secondaire.

3° Équilibre assez exact des enroulements par rapport au sol, qui est relié au milieu de l'enroulement primaire.

Remarque. — En outre, les transformateurs de multiple ayant tout ou partie de leurs enroulements parcourus par le courant continu de la batterie centrale, l'effet de ce courant sur leurs caractéristiques apparentes est à incorporer dans les résultats de mesures relatives à cette catégorie d'appareils. Le tableau 1 ci-dessous, donne quelques indications sur l'importance du courant continu magnétisant. Il contient des valeurs de l'impédance apparente et de l'équivalent de transmission d'un ensemble de deux transformateurs identiques formant un quadripôle

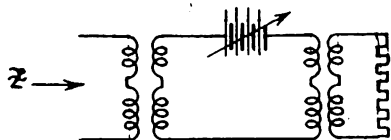


Fig. 2 a. — Mesure de l'impédance d'un ensemble symétrique de deux transformateurs parcourus par du courant continu.

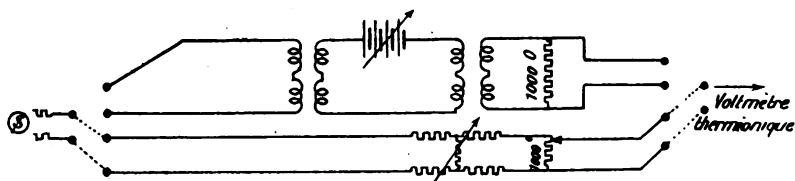


Fig. 2 b. — Mesure de l'équivalent de transmission de l'ensemble de deux transformateurs à dicorde.

symétrique dont l'extrémité est fermée par une résistance pure de 1 000 ohms, conformément aux deux schémas de principe suivants (Fig. 2 a et 2 b).

TABLEAU 1.

Rendement moyen en voltampères pour la fréquence 1 000 p. s. et une tension alternative primaire de 1 V et pour diverses intensités du courant continu magnétisant.

Intensité du courant continu d'alimentation magnétisant (mA)	Impédance Z		Rendement en voltampères	
	Module (ohms)	Argument (grades)	de l'ensemble des deux transformateurs	de chacun des 2 appareils
0	973	+ 33,9	0,68	0,825
27	965	+ 34,9	0,67	0,82
42	957	+ 35,7	0,66	0,815
120	875	+ 43,4	0,62	0,79
240	735	+ 53,7	0,44	0,665
480	471	+ 69,1	0,27	0,52

Pour apprécier la valeur pratique de ces résultats, il importe de remarquer que l'intensité moyenne du courant d'alimentation d'un poste d'abonnés est en moyenne de 50 milliampères, mais peut atteindre des valeurs extrêmes inférieures à 30 milliampères ou supérieures à 80 milliampères (voisines de 100), les variations corrélatives du rendement demeurent en général faibles (1 à 2 pour cent); elles deviendraient naturellement beaucoup plus importantes dans le cas de suralimentation en courant continu.

B. — TRANSFORMATEURS POUR CIRCUITS INTERURBAINS (COMBINAISON ET APPROPRIATION).

Ces transformateurs ont un double rôle :

1° Ils font écran entre les éléments urbains et les éléments proprement interurbains d'une communication.

2° Ils doivent permettre l'appropriation et la combinaison des circuits, c'est-à-dire :

a) ou bien l'utilisation d'un même circuit à 2 fils pour une communication télégraphique superposée à une communication téléphonique (cas de l'appropriation).

b) ou bien l'utilisation de deux circuits à 2 fils pour la constitution

d'un troisième circuit, dit combiné ou fantôme, fonctionnant sans apporter aucune perturbation aux deux circuits de base dits combinants ou réels. Ces deux modes d'exploitation correspondent respectivement aux 2 schémas élémentaires suivants : (Fig. 3 a et 3 b).

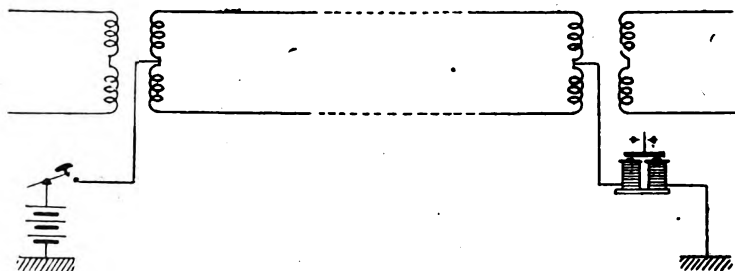


Fig. 3 a. — Schéma d'un circuit téléphonique approprié au télégraphe.

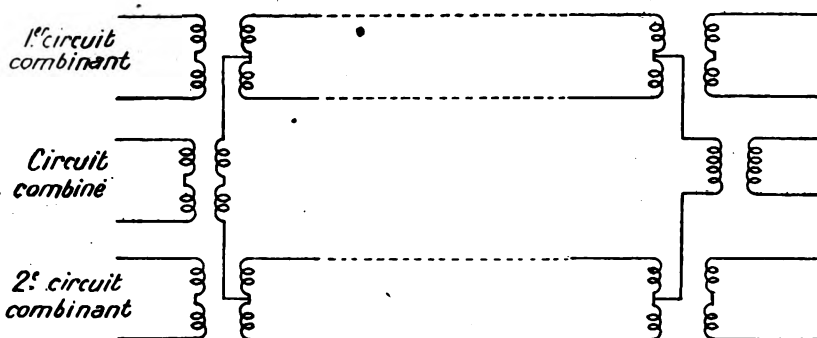


Fig. 3 b. — Schéma utilisé pour la combinaison de 2 circuits téléphoniques.

Il est facile de voir que les conditions relatives au rendement doivent être, dans ce cas, complétées par des conditions rigoureuses d'équilibrage afin qu'aucune diaphonie appréciable ne se manifeste entre combinants et combiné. En outre, ces transformateurs devant transmettre avec une sécurité suffisante les courants d'appels de très basses fréquences, le rendement pour ces fréquences (16 à 50 p : s) est également à prendre en considération, si bien que l'on est conduit, pour les transformateurs de combinaison et d'appropriation, à un examen plus complet et plus minutieux que pour les simples transformateurs de multiple.

Cet examen doit, en somme, porter sur les points suivants :

1° Rendement élevé pour les courants de fréquence téléphonique.

2° Rendement suffisamment grand pour les courants d'appel (basses fréquences).

3° Equilibre aussi exact que possible dans les divers enroulements et effet d'écran entre les deux systèmes de conducteurs côté primaire et côté secondaire.

Dans le cours de la présente étude, ces différents points seront successivement examinés en vue de la recherche des conclusions pratiques qu'il est utile d'en tirer pour la spécification de ces transformateurs.

1° RENDEMENT AUX FRÉQUENCES TÉLÉPHONIQUES.

a) *Rendement énergétique.*

On sait qu'en électricité industrielle et pour tout ce qui concerne les transports et la transmission électrique à haute ou basse tension, la notion que l'on a coutume d'introduire dans les calculs (projets et vérification) est celle de rendement énergétique ou rapport de l'énergie fournie au système d'utilisation par le secondaire du transformateur, à l'énergie fournie au primaire par la source d'énergie. Si l'on désigne par U_s , I_s et φ_s la tension, l'intensité, et la différence de phase secondaires, par U_p , I_p et φ_p la tension, l'intensité et la différence de phase primaires, le rendement énergétique s'exprime par l'égalité :

$$\rho e = \frac{U_s I_s \cos \varphi_s}{U_p I_p \cos \varphi_p}$$

Il est possible de conserver cette formule de rendement et de mesurer le rendement énergétique, lorsqu'il s'agit de transformateurs téléphoniques. Les divers éléments qui interviennent sont, en effet, directement mesurables en utilisant des combinaisons de voltmètres ou de milliampèremètres pour la détermination de U ou de I , et le pont à impédance pour la connaissance de Z_p , φ_p , Z_s et φ_s modules et arguments des impédances primaire et secondaire. On peut d'ailleurs simplifier le rapport précédent et l'écrire :

$$\frac{U_s I_s \cos \varphi_s}{U_p I_p \cos \varphi_p} = \frac{I_s^2}{I_p^2} \cdot \frac{Z_s \cos \varphi_s}{Z_p \cos \varphi_p} = \left(\frac{I_s}{I_p} \right)^2 \cdot \frac{R_s}{R_p}$$

R étant la composante active de l'impédance Z que l'on obtient directement par une simple mesure au pont de Wheatstone.

C'est une mesure de cette nature que paraissent avoir adoptée certains Offices téléphoniques et que le Comité Consultatif International fait figurer parmi les conditions techniques qu'il a arrêtées dans ses

cahiers des charges types. Elle paraît toutefois ne bien convenir que pour caractériser les appareils d'un type de construction nettement déterminé dont les divers éléments ont été spécifiés tant du point de vue de leur nature que de leur qualité et de leurs dispositions respectives, car certains transformateurs peuvent posséder un excellent rendement énergétique et transmettre de façon défectueuse les courants téléphoniques.

b) *Rendement en voltampères.*

La conception du rendement en voltampères est familière aux téléphonistes, en raison de la relation théorique et pratique qui existe entre ce rendement et les qualités transmissives. On sait, en effet, que l'affaiblissement d'un quadripôle symétrique ou dissymétrique est égal au demi-logarithme naturel du rapport des voltampères primaires et secondaires, quand le secondaire est fermé sur l'impédance image correspondante. Ce rendement varie du reste lentement en fonction des caractéristiques (module et argument) de l'impédance Z sur laquelle est fermé le secondaire du transformateur : si l'on désigne par Z_s l'impédance image de sortie du quadripôle, et par p la constante de propagation dont la partie réelle est l'affaiblissement image b , l'expression exacte du rendement en voltampères en fonction de b est la suivante :

$$\begin{aligned} -\operatorname{Log}_e \varphi_{va} &= -\operatorname{Log}_e \frac{U_s I_s}{U_p I_p} \\ &= 2b + \operatorname{Log}_e \left[\left(1 + \frac{1}{4} \right) \left(\frac{Z_s}{Z} + \frac{Z}{Z_s} - 2 \right) \left(1 - e^{-4p} \right) \right] \end{aligned}$$

Le terme correctif demeure relativement petit, alors que Z diffère déjà notablement de Z_s . Le rendement en voltampères paraît donc mieux approprié que le rendement énergétique, à caractériser un transformateur dont les éléments de construction ne sont pas connus *a priori*. Pour s'en rendre compte, il suffit de remarquer que si on place en série avec le primaire du transformateur, une réactance pure incorporée à l'impédance apparente du transformateur, mais n'ayant aucun couplage avec le secondaire, on ne modifie en aucune façon la valeur précédemment donnée du rendement énergétique; il est d'autre part bien évident qu'en général l'effet d'une telle réactance (qui est d'ailleurs analogue à l'effet d'une réactance de fuite), ne peut qu'augmenter la perte de transmission du transformateur dans un circuit. Il en résulte qu'un tel transformateur, examiné sous le rapport du ren-

dement énergétique, peut être reconnu comme satisfaisant alors que son équivalent de transmission est considérable :

Il est possible de citer à cet égard le cas concret d'un transformateur examiné au Service d'Etudes et de Recherches Techniques des Postes et Télégraphes dont les caractéristiques de transmission étaient les suivantes :

Rendement énergétique	0,89
— en voltampères	0,57
Equivalent de transmission	0,28 (népers).

Pour bien apprécier l'importance de cet équivalent de transmission, il faut noter que pour un transformateur de bonne qualité, répondant convenablement aux exigences de la technique téléphonique, l'équivalent de transmission normal est de l'ordre de 0,05 à 0,1 néper.

c) Détermination du rendement par de simples mesures d'impédance.

Dans un article récemment paru dans T. F. T. (*Telegraphen-und-Fernsprech-Technik*), MM. FELDTKELLER et V. GANDTNER ont examiné un autre procédé qui permet, par de simples mesures d'impédance, de se rendre compte des qualités du transformateur. On sait, en effet, que pour un transformateur parfait de rapport 1/1, l'impédance apparente Z_p de l'enroulement primaire, lorsque le secondaire est bouclé sur l'impédance Z , doit précisément être égal à Z . S'il n'en est pas ainsi, il y a déformation, et cette déformation est en rapport avec les qualités transmissives du transformateur. Les auteurs concluent à la possibilité de vérifier les qualités des transformateurs uniquement par des mesures d'impédance primaire, le secondaire étant fermé par une impédance non réactive de 800 ohms; dans ces conditions, l'impédance primaire doit avoir un module ou une composante en phase comprise entre certaines limites assez strictes (par exemple 800 et 880 ohms) et un argument (ou une réactance) inférieurs à de certaines valeurs toujours petites (réactance < 160 ohms, argument $< 12^\circ$ environ). Ils proposent de faire une mesure de genre à la fréquence 300 p : s et d'exécuter quelques mesures complémentaires, en petit nombre seulement, à la fréquence 1 000 p : s.

Quoique cette condition de reproduction parfaite des impédances soit plus particulièrement importante pour les transformateurs placés dans les circuits munis de relais amplificateurs (en raison de la nécessité où l'on se trouve de constituer des réseaux d'équilibre), il est possible de

tirer des mesures d'impédance des conclusions pratiques parallèles à celles qui résultent des essais de rendement.

On peut également se proposer de déterminer l'affaiblissement propre du transformateur en assimilant ce dernier à un quadripôle dont on mesure les impédances primaires Z_i et Z_b , le secondaire étant successivement isolé et en court-circuit.

On sait que, des deux nombres complexes Z_i et Z_b , on déduit l'affaiblissement propre par la formule :

$$Th_p = Th(b + ja) = \sqrt{\frac{Z_b}{Z_i}}$$

Si ces mesures n'ont pas un intérêt pratique immédiat, elles permettent néanmoins de voir (tableau II) jusqu'à quel point les lois simples du quadripôle sont applicables au transformateur à fer. La concordance entre les divers résultats apparaît comme satisfaisante et les ordres de grandeur, sinon les valeurs rigoureuses, se correspondent assez exactement.

d) *Comparaison de quelques transformateurs
suivant ces diverses méthodes.*

Le tableau II ci-dessous donne quelques indications sur les résultats comparatifs qu'il a été possible d'obtenir en appliquant les méthodes précédentes à divers transformateurs de caractéristiques et de rendements très différents, mais ayant tous un rapport de nombre de tours primaire et secondaire égal à 1. Toutefois, au lieu de choisir la fréquence 320 p : s comme le suggèrent MM. FELDTKELLER et V. GANDTNER, toutes les comparaisons ont été faites à la fréquence 1 000 p : s.

TABLEAU II.

Transformateurs	Rendement		Impédance primaire secondaire fermée sur 1.000 ohms				Affaiblissement déduit du rendement en voltamp.	Affaiblissement déduit de la mesure Z_i, Z_b
	en volt amp.	énergét.	module ohms	argument grades	résist. ohms	réact. ohms		
A	0,895	0,90	1076	5,3	1072	89,5	0,055	0,05
B	0,57	0,89	1632	56,5	1031	1266	0,3	0,29
C	0,895	0,90	1088	4,3	1085	74,1	0,055	0,055
D	0,92	0,93	1075	9,9	1061	176,5	0,04	0,09

Ces résultats font nettement ressortir l'influence des inductances de fuite qui sont caractérisées par une augmentation considérable de la réactance.

Le transformateur se comporte en somme comme un transformateur de rendement excellent (composante en phase de l'impédance ou par différence de la résistance secondaire), auquel on ajoute un élément purement réactif. Cet élément n'a évidemment aucune influence sur le rendement énergétique, puisqu'il ne consomme aucune puissance wattée, mais il intervient pour réduire la puissance apparente réellement fournie au primaire et augmenter la chute de tension réelle entre primaire et secondaire, c'est-à-dire l'équivalent de transmission du système.

Si, d'ailleurs, on mesure le rapport des tensions secondaires et primaires, toujours dans les mêmes conditions d'impédance secondaire, on obtient, pour des appareils précédemment cités, les résultats suivants :

TABLEAU III.

Tension secondaire U en volts pour 1 V au primaire, le secondaire étant fermé par une résistance non inductive de 1 000 ohms.

Transformateurs	Tension secondaire		
	Fréquence 1000 p : s	Fréquence 2000 p : s	Fréquence 3000 p : s
A	0,91	0,915	0,92
B	0,60	0,37	0,27
C	0,91	0,91	0,91
D	0,92	0,91	0,90

On remarque en particulier, dans ce tableau, que pour le transformateur B ayant un couplage très imparfait entre primaire et secondaire, le rendement en voltampères et la tension secondaire décroissent quand la fréquence augmente, en raison de l'augmentation croissante de la réactance de fuite (le coefficient d'inductance de fuite restant constant).

Les exemples précédents montrent qu'il y a, au moins dans les grandes lignes, un accord satisfaisant entre les deux conceptions rela-

tives aux exigences à imposer aux transformateurs pour les fréquences téléphoniques. Au contraire, un Cahier des Charges se bornant à spécifier un rendement énergétique sans conditions supplémentaires relatives à l'argument, à la réactance ou à la constitution intérieure de l'appareil (spécification du noyau, disposition des enroulements, etc...) pourrait conduire à la réception d'appareils ayant de mauvaises caractéristiques de transmission.

Le principe de la mesure en voltampères étant admis, trois points restent toutefois à préciser pour que soient complètement définies les conditions de la mesure :

- Fréquence principale du courant de mesure;
- Valeur de l'impédance secondaire;
- Tension primaire;

Fréquence principale de mesure.

Les fréquences téléphoniques qui entrent dans la constitution de la parole et que doivent correctement transmettre les transformateurs s'échelonnent, en principe, de 16 à plus de 10 000 périodes par seconde. Toutefois, en pratique, on peut restreindre cet intervalle et admettre que seules soient bien transmis les courants de fréquences comprises entre 200 et 3 000 p : s. Ceci conduit donc à adopter une limite inférieure du rendement pour les courants de fréquences comprises entre 200 et 3 000 p : s. Toutefois, étant donnée l'expérience que l'on possède des transformateurs les plus communément utilisés, on peut être assuré que cette condition de constance relative au rendement en voltampères, sera en général assez bien réalisée, quand le rendement pour la fréquence 1 000 p : s est supérieur à une valeur donnée par exemple 0,86. La fréquence 1 000 p : s représente d'ailleurs, en raison des caractéristiques de transmission des appareils téléphoniques, une fréquence moyenne pour laquelle il paraît utile de faire subir à tous les transformateurs d'un lot un essai systématique détaillé. Une vérification moins générale pourra en outre être exécutée pour des courants de fréquences extrêmes 200 et 3 000 p : s.

Valeur de l'impédance secondaire.

Le rendement en voltampères d'un transformateur dépend, dans une large mesure, de la valeur de l'impédance secondaire. De nombreuses mesures faites sur les types de transformateurs précédents dont

les secondaires étaient shuntés pour des impédances constituées par des

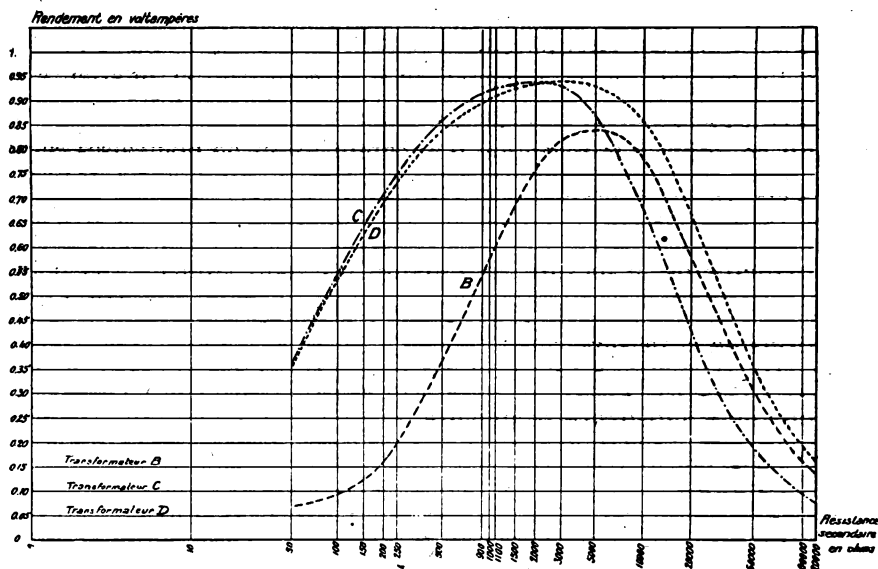


Fig. 4. — Variation du rendement en voltampères en fonction de l'impédance secondaire (résistance pure).

résistances pures comprises entre 900 et 5 000 ohms, le rendement en voltampères n'accusait que des variations très peu accentuées; ces va-

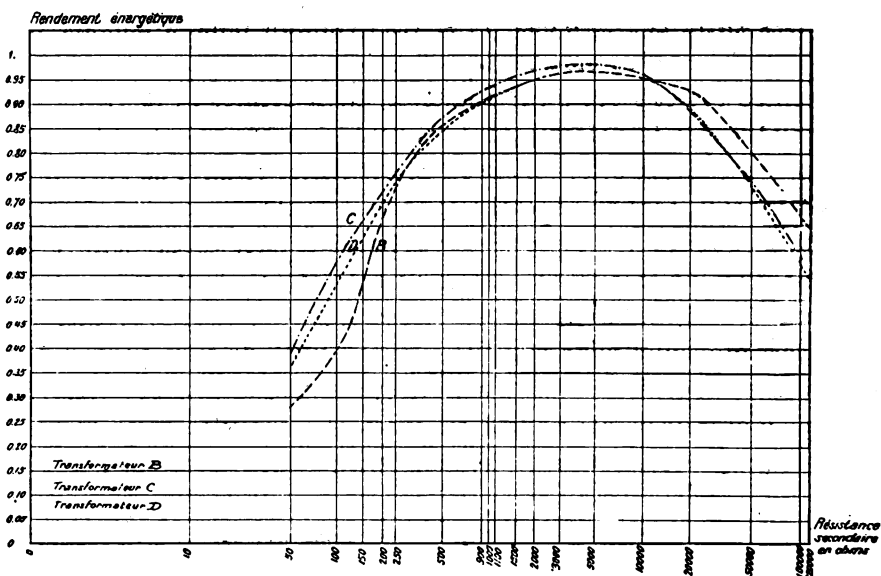


Fig. 4 bis. — Variation du rendement énergétique en fonction de l'impédance secondaire (résistance pure).

leurs d'impédances secondaires correspondent à une zone assez large

pour laquelle ce rendement passe par un maximum; de part et d'autre de cette zone, le rendement tend naturellement vers zéro (valeur nulle et valeur infinie de l'impédance secondaire). Il faut également noter que pour le transformateur B à faible couplage, et comme il fallait s'y attendre, l'infériorité manifestée par rapport aux autres types va s'atténuant quand la valeur de l'impédance secondaire va croissant.

Il résulte des courbes ci-jointes (Fig. 4, 4 bis et 4 ter qui résument

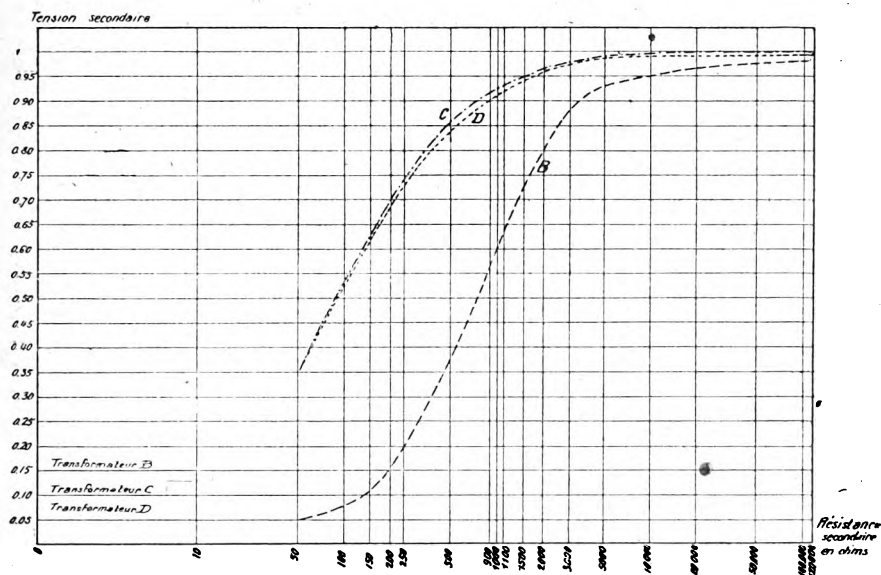


Fig. 4 ter. — Variation de la tension secondaire (1 V primaire) en fonction de l'impédance secondaire (résistance pure).

les résultats de ces mesures) que la valeur de 1 000 ohms, qui s'écarte d'ailleurs relativement peu des valeurs des impédances des circuits réels (600 ohms environ), paraît caractériser assez bien l'impédance critique à partir de laquelle des changements importants interviennent, dans la valeur du rendement, aussi bien pour le rendement en voltampères que pour le rendement énergétique. Elle facilite en outre les calculs rapides et a été adoptée, pour le moment, pour la mesure de ces rendements.

En vue de rechercher l'importance de l'argument de l'impédance secondaire, il était intéressant de compléter les renseignements précédents par des indications relatives à la variation du rendement en fonction de l'argument (l'argument variant de -90° à $+90^\circ$ et le module de l'impédance restant constant et égal à 1 000 ohms).

Les résultats obtenus (traduits dans les courbes des figures 5,5 bis et 5 ter, ont permis de constater que les variations du rendement en volt-ampère étaient en général faibles, comprises entre 0,9 et 1,1; le ren-

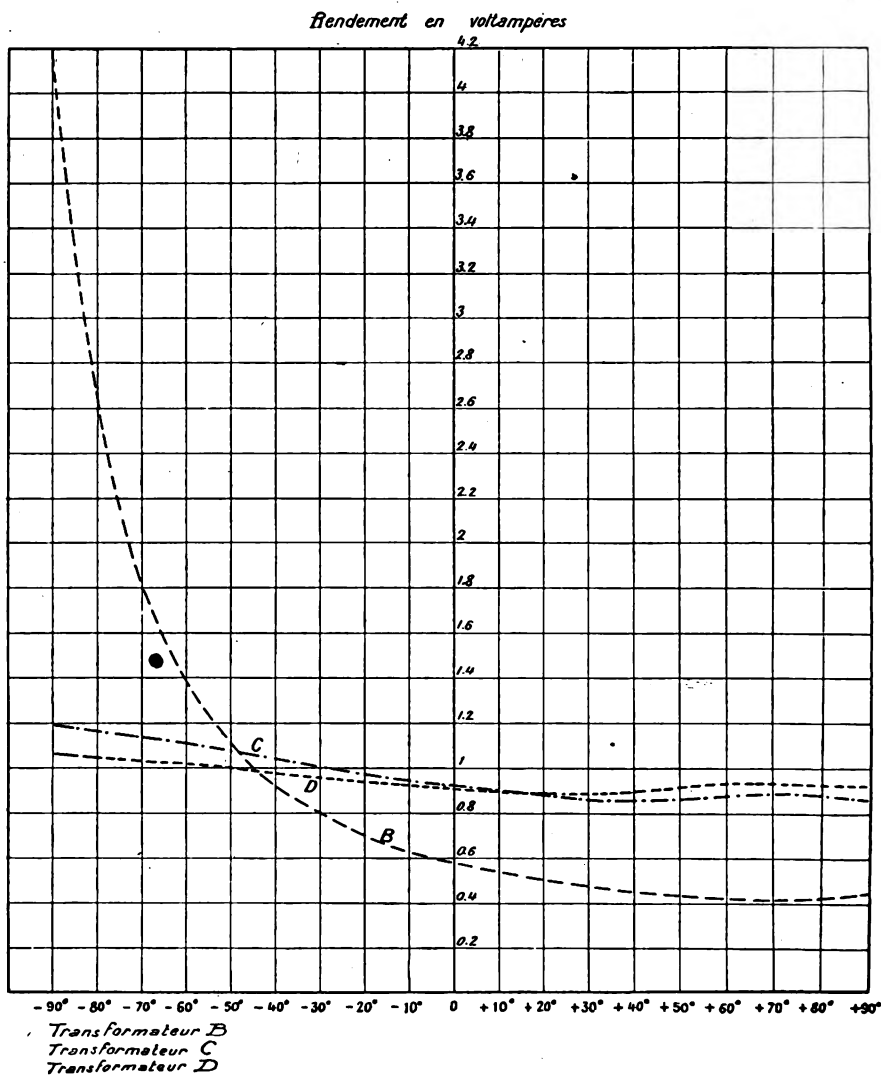


Fig. 5. — Variation du rendement en fonction de l'argument de l'impédance secondaire.

dement énergétique varie au contraire, comme on pouvait s'y attendre, de 0 à 0 en passant par un maximum pour un argument nul; ce maximum a d'ailleurs une courbure très peu accentuée. Toutefois, il faut signaler ici certaines anomalies très remarquables qui se produisent

pour certains transformateurs dont le rendement en voltampères, par suite de phénomènes de résonance, dépasse de beaucoup l'unité. C'est en particulier le cas du transformateur B précédemment cité dont le

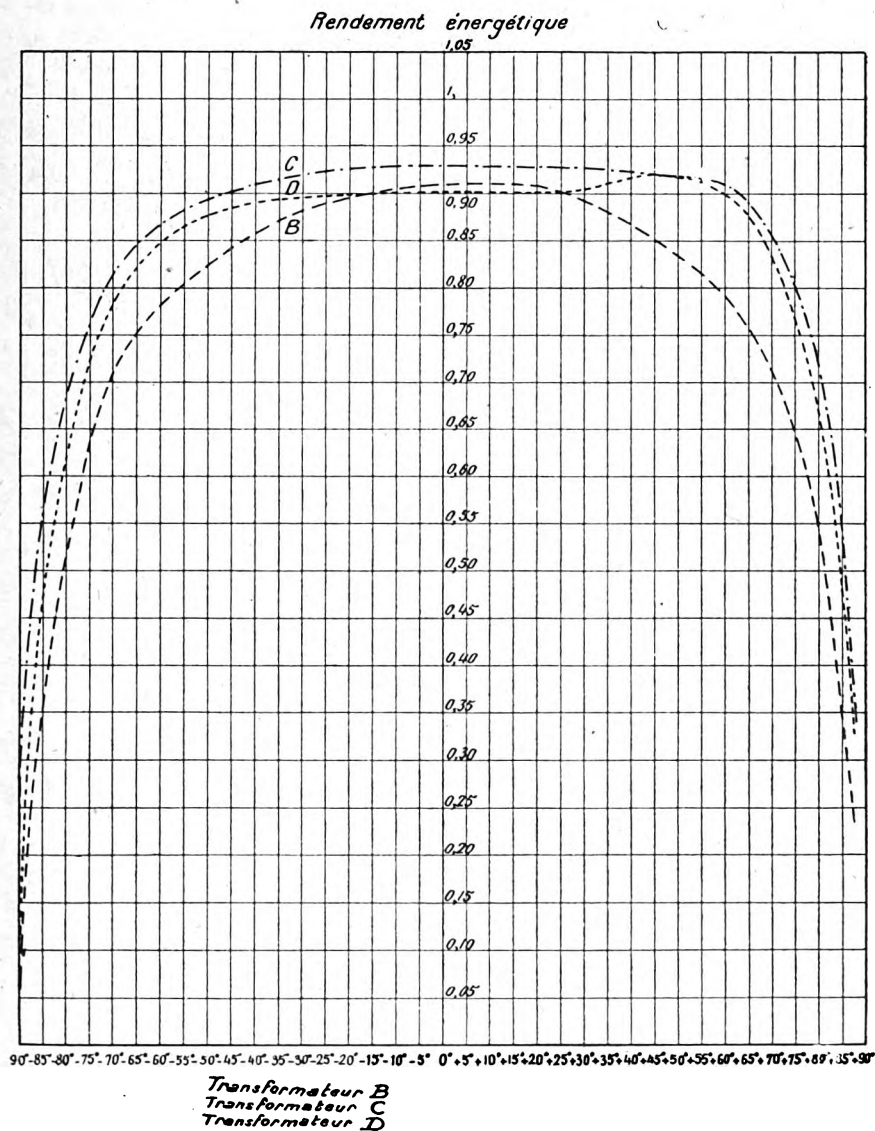


Fig. 5 bis. — Variation du rendement en fonction de l'argument de l'impédance secondaire.

rendement en voltampères croît de façon continue de 0,4 pour un angle de $+90^\circ$ de l'impédance secondaire à la valeur 4,1 pour un angle de -90° de cette impédance. Cette constatation confirme d'ail-

leurs les indications précédemment recueillies relativement à une réaction faible d'un enroulement sur l'autre.

Dans le cas général, l'impédance de 1 000 ohms non réactifs, permet

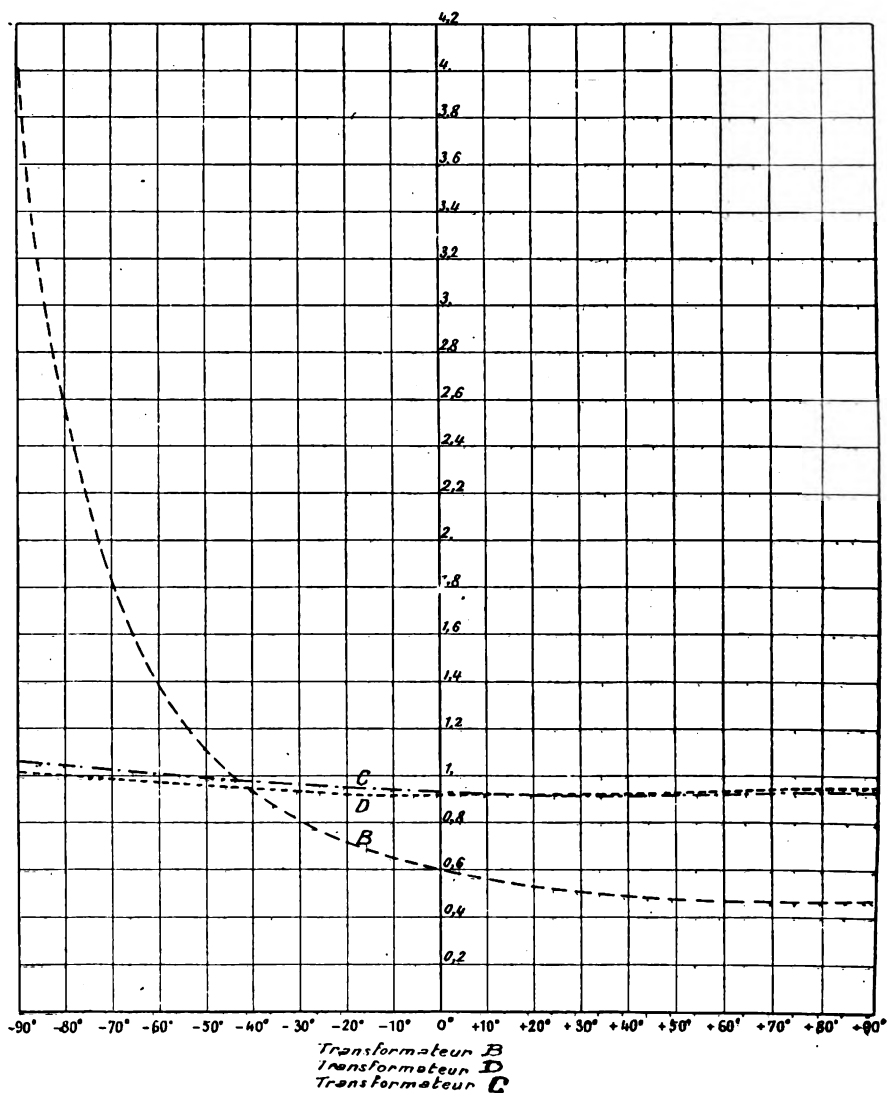


Fig 5 ter. — Variation de la tension secondaire en fonction de l'argument de l'impédance secondaire.

toutefois ici encore d'apprécier commodément l'ordre de grandeur du rendement moyen du transformateur, même dans les cas de résonance, et c'est pourquoi cette valeur a été proposée pour des essais de réception.

Tension primaire.

La valeur de la tension primaire a dans certains cas (principalement aux basses fréquences) une influence considérable sur le rendement, en raison de son action sur les caractéristiques magnétiques du fer entrant dans la constitution du noyau. Les exemples ci-après (tableau IV) relevés sur trois transformateurs de types différents et pour des courants de fréquence 16 p : s, 42 et 1 000 p : s, permettant de rendre compte de l'importance de cette action.

TABLEAU IV. — *Rendement en fonction de la tension primaire et de la fréquence.*

Tension primaire en Volts	Transformateur (a)			Transformateur (b)			Transformateur (c)		
	16 p : s	42 p : s	1000 p : s	16 p : s	42 p : s	1000 p : s	16 p : s	42 p : s	1000 p : s
0,5	0,02	0,29	0,89	0,35	0,65	0,58	0,29	0,54	0,905
1	0,05	0,34	0,90	0,46	0,68	0,58	0,44	0,61	0,91
5	0,15	0,47	0,91	0,65	0,74	0,585	0,61	0,75	0,915
10	0,33	0,51	0,92	0,70	0,78	0,60	0,70	0,79	0,92

Etant donné que la tension primaire aux bornes d'un transformateur pour lignes à grande distance est d'environ 1 volt (l'origine du circuit) et que pour les fréquences téléphoniques, la variation du rendement en fonction de la tension est relativement peu accusée, cette valeur de 1 volt paraît assez bien indiquée pour les essais de rendement aux fréquences téléphoniques.

2° RENDEMENT AUX TRÈS BASSES FRÉQUENCES.

Pour des raisons analogues à celles qui ont été données pour les fréquences téléphoniques, il y a lieu, ici encore, de définir les trois éléments essentiels qui permettront de préciser les conditions de mesure du rendement en voltampères, toujours le plus intéressant à considérer :

- fréquence;
- impédance secondaire;
- tension primaire;

Comme le rendement va en décroissant beaucoup quand la fréquence diminue (ainsi que cela ressort du tableau IV ci-dessus qui met en évidence des variations considérables pour de très basses fréquences et pour diverses tensions primaires, il suffit de s'assurer par un essai à la plus basse fréquence utilisée pour la signalisation, que le rendement est encore assez grand; c'est donc la fréquence de 16 p : s qui paraît le mieux convenir pour ce mode de vérification. En ce qui concerne l'impédance secondaire et la tension primaire, les valeurs respectives de 1 000 ohms et de 10 volts définissent des conditions de mesure, suffisamment voisines des conditions de la pratique et susceptibles de faire apparaître les qualités essentielles de l'appareil en essai.

Procédé de mesure.

Le rendement en voltampères ou sa traduction par un équivalent en unités d'affaiblissement, se prête à une mesure simple et rapide. Il suffit, en effet, de réaliser un dispositif permettant de lire successivement :

a) l'équivalent en décinépers b_1 du rapport des tensions primaire et secondaire (l'enroulement primaire étant placé en parallèle avec une ligne potentiométrique de 1 000 ohms de résistance et gradué directement en décinépers);

b) l'équivalent en décinépers b_2 du rapport des courants primaire et secondaire (l'enroulement primaire étant placé en série avec la ligne potentiométrique).

La disposition schématique des organes est la suivante (fig. 6 et 7).

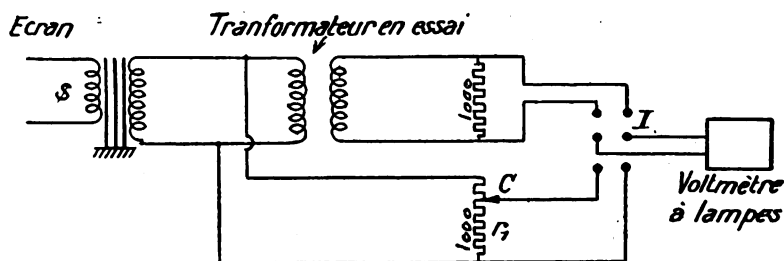


Fig. 6. — Disposition parallèle : rapport des tensions.

Pour exécuter les mesures, on règle le curseur du potentiomètre C jusqu'à ce que le voltmètre à lampes V indique la même tension pour les deux positions du commutateur C.

En prenant la somme des deux lectures b_1 et b_2 effectuées sur la boîte

d'affaiblissement-potentiomètre, on obtient un nombre qui représente l'affaiblissement des transformateurs, par traduction en népers du rendement en voltampères. Ce nombre, toujours très petit, doit, pour un bon appareil, demeurer inférieur à $1/10$ de néper pour les fréquences téléphoniques et à 3 décinépers pour la fréquence 16 p : s dans

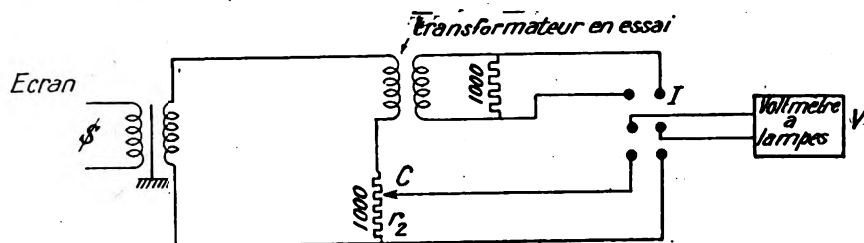


Fig. 7. — Disposition série : rapport des courants.

les conditions respectives de tension qui ont été indiquées précédemment (1 et 10 volts primaire).

Remarque. — Toute autre disposition de mesure permettant de lire directement des rapports de puissance apparente et analogues à ceux qui ont été proposés par divers Offices, peuvent d'ailleurs être employés concurremment avec la méthode décrite ci-dessus.

3° CONDITIONS RELATIVES À L'ÉQUILIBRE ET À LA DIAPHONIE.

La disposition électrique des transformateurs de combinaison impose à ces appareils d'être très bien équilibrés, afin de n'introduire que le minimum de diaphonie entre les circuits combinés et combinants. La diaphonie peut résulter de divers déséquilibres inhérents au mode de construction de l'appareil. Ces défauts se manifestent principalement sous trois formes :

Déséquilibre d'inductances δ_i provenant d'une différence d'inductance entre les deux enroulements primaires (secondaire isolé).

Déséquilibre de résistances effectives δ_r (secondaire en court-circuit).

Déséquilibre de capacités δ_c entre demi-enroulements primaires et secondaires.

Les valeurs de ces déséquilibres sont déterminées par des mesures sommaires dont le principe peut en même temps leur servir de définition. Les schémas (fig. 8) sont en effet ceux de ponts de Wheatstone

simplifiés dont le bras de proportion est variable. Ce bras est constitué par un simple potentiomètre dont la prise variable est reliée à un des fils du téléphone; le second fil aboutit au point de réunion des deux éléments dont il s'agit de vérifier la symétrie. En raison de la complexité des impédances qui entrent en jeu dans les enroulements du transformateur, on ne peut songer, par le seul déplacement du curseur à obtenir une extinction totale du son dans le téléphone. Tou-

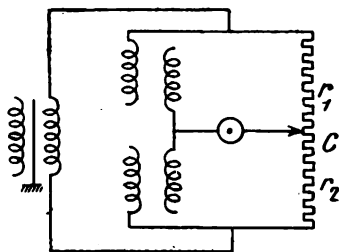


Fig. 8 a. — Déséquilibre des capacités.

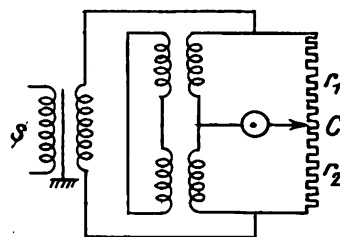


Fig. 8 b. — Déséquilibre des résistances effectives.

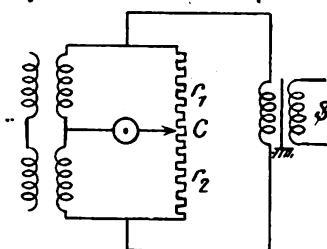


Fig. 8 c. — Déséquilibre des inductances.

tefois, si le transformateur est convenablement réalisé (et c'est là une des conditions de réception), un minimum de son doit être nettement perçu pour une certaine position du curseur C susceptible d'être définie dans un intervalle très étroit. Une « plage » de minimum trop large correspond en général à un minimum peu accentué et à une mauvaise disposition interne des divers éléments du transformateur. Le résultat de la mesure s'exprime sous la forme d'un certain rapport entre la différence et la somme des deux résistances complémentaires r_1 et r_2 du potentiomètre.

Pour de bons transformateurs, les trois nombres δi , δr , δc sont respectivement inférieurs à $\frac{3}{1000}$, $\frac{5}{1000}$ et $\frac{5}{100}$. La condition de déséquilibre des capacités s'accompagne, comme dans le cas des trans-

formateurs de dicorde, d'une condition de maximum de capacité (par exemple 2 millièmes de microfarad) entre primaire et secondaire, qui complète l'effet d'écran produit par l'appareil.

Ces diverses mesures, surtout intéressantes pour l'étude d'un type d'appareil, sont en général assez longues et sont avantageusement complétées et même, pour la majorité des appareils examinés, remplacées par un essai de diaphonie qui ne fournit, au fond qu'un moyen rapide et pratique d'évaluer le déséquilibre en millièmes ou en unités d'affaiblissement, et dans des conditions voisines des conditions d'utilisation. Une telle vérification s'opère aisément en utilisant un schéma analogue aux schémas des deux figures 9 a et 9 b.

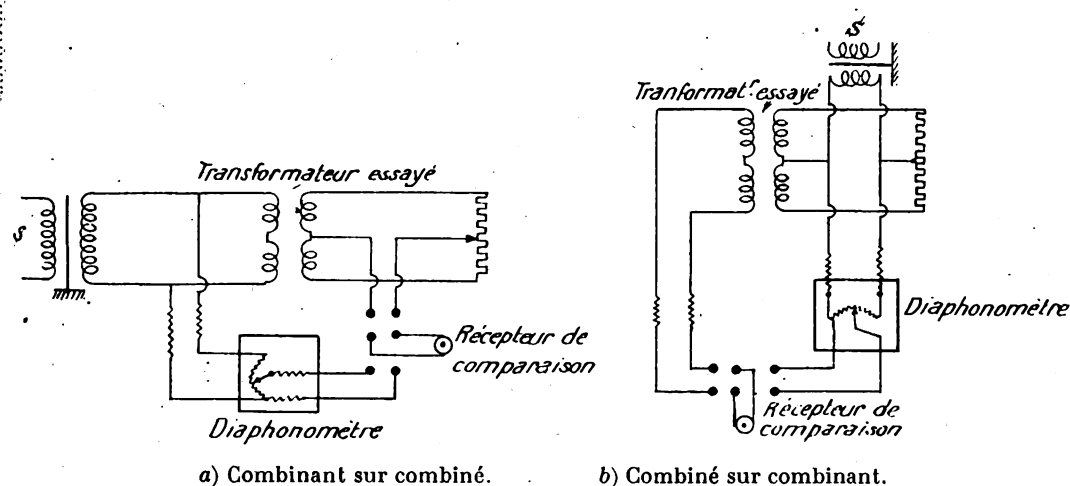


Fig 9. — Mesure de la diaphonie.

qui se rapportent respectivement à la mesure de la diaphonie propre due aux transformateurs, en envisageant les deux cas complémentaires de l'induction exercée par les éléments du combiné sur ceux du combinant ou, inversement, par les éléments du combinant sur ceux du combiné. Des appareils sérieusement étudiés et bien équilibrés donnent, dans ces conditions, un résultat de mesure supérieur à 8, 9, même parfois 10 népers soit un rapport dépassant 4 000 entre les intensités du courant inducteur et du courant induit.

CONCLUSION.

En résumé, ainsi que les quelques notes précédentes ont tenté de le faire ressortir d'après les résultats expérimentaux, les transformateurs

couramment utilisés dans le service téléphonique sont, dans une large mesure, assimilables à des quadripôles ou à des combinaisons de quadripôles et, comme tels, il est possible de les caractériser par des nombres qui définissent leurs qualités transmissives et leur aptitude à remplir les conditions que leur impose la technique téléphonique moderne. Sous le rapport du rendement aux diverses fréquences (fréquences proprement téléphoniques et fréquences des courants d'appel) et de l'équilibre interne entre enroulements, ces conditions se distinguent nettement de celles que l'électrotechnique a coutume de prendre en considération. Les différences ne résident pas seulement dans les ordres de grandeur très divers des éléments essentiels (tension des courants à transmettre) mais aussi dans la nature des facteurs principaux (tels, équivalents de transmission et rendement en voltampères, au lieu des rendements énergétiques). A cet égard, les courbes données plus haut et obtenues sur des transformateurs de qualités diverses, indiquent les valeurs qu'il est utile d'imposer aux caractéristiques des transformateurs téléphoniques. Ces résultats sont aisément vérifiables par des mesures simples et prêtent à une définition précise et pratique des conditions expérimentales de travail.

MÉTHODES ET APPAREILS DE MESURE DES DÉSÉQUILIBRES DES CABLES TÉLÉPHONIQUES ⁽¹⁾

Par M. DUNAND.

Importance de la réduction de la diaphonie. — Déséquilibres et diaphonie entre les divers circuits d'un câble. — Mesure des différences des capacités élémentaires. — Mesure par compensation de la diaphonie.

Importance de la réduction de la diaphonie.

Un des problèmes les plus délicats que l'on ait à résoudre lors de l'établissement des lignes téléphoniques est celui de la réduction de la diaphonie ou mélange des conversations.

Ce problème a pris une importance encore plus grande avec le développement de plus en plus étendu des lignes souterraines à grande distance.

Les raisons pour lesquelles on doit s'attacher à réduire la diaphonie, sont les suivantes :

- 1° assurer le secret des conversations ;
- 2° ne pas nuire à la netteté de la transmission ;
- 3° assurer le bon fonctionnement des relais amplificateurs.

En vue de réduire la diaphonie, on est conduit à imposer aux différents éléments (transformateurs de terminaison, câble proprement dit, bobines de charge, relais amplificateurs), qui interviennent dans la constitution des circuits à longue distance, des conditions, dites d'équilibrage, qui, si elles étaient parfaitement réalisées, assureraient à un système de transmission une diaphonie nulle.

Nous allons montrer, par un exemple, quelle est la rigueur des conditions d'équilibrage qui doivent être imposées aux éléments constitutifs d'un circuit téléphonique :

Pour qu'une conversation existant sur un circuit ne puisse pas devenir intelligible sur un circuit voisin, il faut que l'énergie induite par diaphonie sur ce dernier, ne soit pas supérieure à $1/1000\,000$ de l'énergie transmise par le circuit sur lequel a lieu la conversation ; on

(1) Communication présentée à la 5^e Section de la Société française des Electriciens, le 3 mai 1929.

s'impose en général, pour cette fraction de puissance, induite par la diaphonie, une valeur maximum de $1/10\,000\,000^\circ$, en ce qui donne, entre la tension induite et la tension inductive, un rapport sensiblement égal à $1/3\,000^\circ$.

On voit, d'après ces chiffres, que le problème de la réduction de la diaphonie conduit à faire des mesures de très haute précision; de plus, le nombre de mesures que l'on doit effectuer, aussi bien à l'usine que sur le terrain de pose, est considérable; il est donc très important d'avoir à sa disposition des appareils précis, robustes et donnant rapidement des résultats directement utilisables.

Déséquilibres et diaphonie entre les divers circuits d'un câble.

Nous nous proposons, ici, de passer rapidement en revue les méthodes et appareils de mesures utilisés en vue de la détermination des déséquilibres de capacité électrostatique dans les câbles téléphoniques. Ces déséquilibres ont une grande influence sur la diaphonie, surtout pour les câbles pupinisés, où les tensions existant sur les circuits sont beaucoup plus élevées que dans les câbles non chargés, pour une même puissance transmise.

De plus, par raison d'économie, on emploie dans les câbles à longue distance la combinaison des circuits, c'est-à-dire que les paires du câble sont groupées deux à deux pour constituer des « quartes »; on sait que chaque quarte permet d'assurer trois communications: deux communications circulant respectivement dans la première et la deuxième paire de la quarte et une troisième communication circulant dans le circuit « combiné »; ce circuit utilise les deux fils de la première paire en parallèle comme conducteur d'aller et les deux fils de la deuxième paire en parallèle comme conducteur de retour. Enfin, il est intéressant de considérer un quatrième circuit dit « circuit approprié » utilisant les quatre fils de la quarte en parallèle avec retour par la terre; ce circuit n'est pas utilisé couramment pour la transmission, mais il est le siège d'un phénomène important: c'est, en effet, sur ce circuit que sont appliquées les tensions induites par les courants circulant sur les lignes de transport d'énergie qui peuvent se trouver à proximité du câble.

Les déséquilibres de capacité les plus importants que l'on rencontre, en pratique, dans les câbles à longue distance, sont ceux qui existent entre les différents circuits d'une même quarte; ce sont donc ces déséquilibres que l'on devra surtout chercher à réduire.

Au point de vue électrostatique, une quarte peut être représentée schématiquement par 10 capacités élémentaires C_1, C_2, W, X, Y, Z .

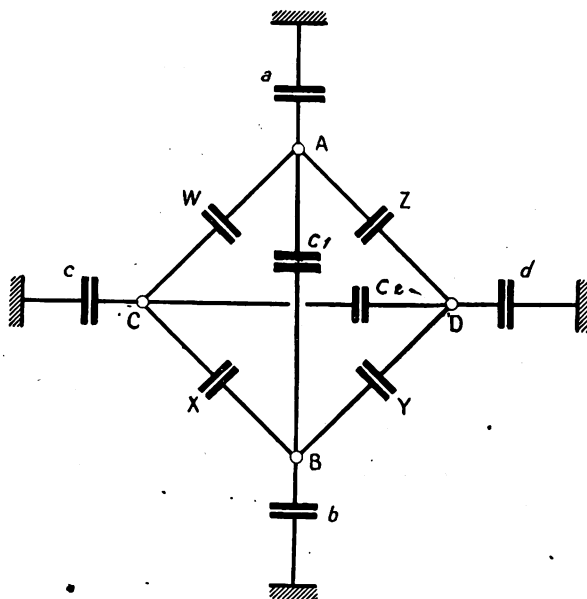


Fig. 1. — Schéma des capacités intervenant dans une quarte.

a, b, c, d , disposées comme l'indique la figure 1. Dans cette figure, A et B désignent les deux fils de la première paire ; C et D les deux fils de la deuxième paire. Seules les capacités W, X, Y, Z, a, b, c, d , interviennent au point de vue de la diaphonie.

Pour qu'une quarte soit parfaitement équilibrée, c'est-à-dire, pour qu'il n'existe aucune diaphonie entre ses 4 circuits, il faut que les capacités élémentaires vérifient les 6 relations :

$$\begin{cases} W = X = Y = Z, \\ a = b = c = d. \end{cases}$$

En pratique, ces conditions ne sont jamais vérifiées d'une façon rigoureuse et il y a lieu de considérer les diaphonies suivantes, existant entre les quatre circuits de la quarte, puis deux à deux :

- 1° Diaphonie entre la première et la deuxième paire : D I/II ;
- 2° Diaphonie entre la première paire et le circuit combiné : D-I/C ;
- 3° Diaphonie entre la deuxième paire et le circuit combiné : D-II/C ;
- 4° Diaphonie entre la première paire et le circuit approprié : D-I/T ;
- 5° Diaphonie entre la deuxième paire et le circuit approprié : D-II/T ;
- 6° Diaphonie entre le circuit combiné et le circuit approprié : D-C/T.

On démontre que ces diverses diaphonies sont respectivement proportionnelles aux quantités suivantes, que l'on désigne ordinairement sous le nom de « déséquilibres de capacités » :

$H = (W - X) - (Z - Y)$	proportionnel à	$D\text{ I/II,}$
$U = 2[(W - X) + (Z - Y)] + a - b$	»	$D\text{-I/C,}$
$V = 2[(W - Z) + (X - Y)] + c - d$	»	$D\text{-II/C,}$
$u = a - b$	»	$D\text{-I/T,}$
$v = c - d$	»	$D\text{-II/T,}$
$w = (a + b) - (c + d)$	»	$D\text{ I/T.}$

Ce sont ces quantités qu'il importe de mesurer le plus exactement et le plus rapidement possible.

Les méthodes de mesure employées, à cet effet, sont de deux sortes :

1° Les méthodes consistant à mesurer les différences de capacités élémentaires de la quarte, prises deux à deux, dont on déduit par le calcul la valeur des déséquilibres cherchés.

2° Les méthodes de mesures par compensation de la diaphonie qui donnent directement la valeur des six déséquilibres de capacités que nous venons d'énumérer.

I. — Méthode par mesure des différences de capacités élémentaires de la quarte.

Dans cette méthode, on utilise le montage représenté par la figure 2 : On dispose, entre les fils A et B, une tête de pont à bras égaux et

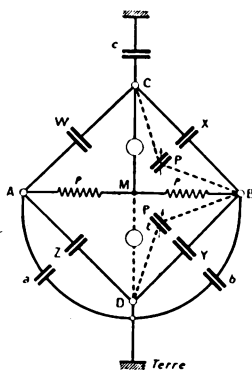


Fig. 2. — Mesure des différences des capacités élémentaires de la quarte.

le point D est relié à la terre ; on connecte entre C et B, d'une part, et D et B, d'autre part, des condensateurs variables P et P', de valeur connue ; on alimente l'ensemble du dispositif en A et B, au

moyen d'une source de courant audible et un téléphone, connecté successivement entre les points CM et MD, permet de déceler l'équilibre du double pont ainsi constitué. Quand le courant est nul dans le téléphone, on a évidemment :

$$P = W - X \quad \text{et} \quad P_t = (Z - Y) + (a - b).$$

En permutant convenablement les connexions, on obtiendrait de même les valeurs :

$$\begin{aligned} Q &= Z - Y, & Q_t &= (W - X) + (a - b), \\ R &= W - Z, & R_t &= (W - X) + (c - d), \\ S &= X - Y, & S_t &= (W - Z) + (c - d). \end{aligned}$$

On pourra, par un calcul convenable, déduire les valeurs des déséquilibres de capacité de la quarte à partir de ces huit quantités ; on a par exemple :

$$V = 2P + Q + P_t.$$

On voit que dans cette méthode, pour arriver à connaître les déséquilibres de capacités de la quarte, il faut faire 8 mesures et un nombre important de calculs ; il faut d'ailleurs remarquer que la valeur du déséquilibre w ne peut être calculée à partir des valeurs données précédemment et sa détermination exigerait, par suite, au moins une mesure supplémentaire.

II. — Méthodes de mesures par compensation de la diaphonie.

La méthode décrite précédemment a été abandonnée pour les méthodes par compensation de la diaphonie qui donnent directement les six valeurs de déséquilibre de capacité de la quarte.

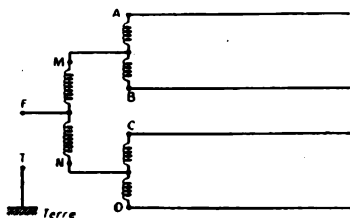


Fig. 3. — Représentation des 4 circuits d'une quarte.

Les quatre circuits (1^{re} paire, 2^e paire, combiné et approprié) de la quarte peuvent être matérialisés au moyen de trois self-inductances équilibrées, disposées comme l'indique la figure 3. On a alors :

entre le point A et B :	la 1 ^{re} paire,
entre les points C et D :	la 2 ^e paire,
entre les points M et N :	le circuit combiné,
entre les points F et T :	le circuit approprié.

Supposons que nous voulions mesurer la déséquilibre de capacité entre la première paire et le circuit combiné ; à cet effet, alimentons la 1^{re} paire par une source de courant disposée entre les points A et B ; disposons un téléphone entre les points M et N (circuit combiné) et

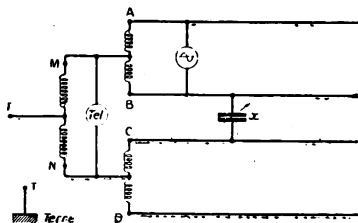


Fig. 4. — Principe de la mesure du déséquilibre de capacité.

branchons entre les fils B et C un condensateur variable x (fig. 4) : si E désigne la tension appliquée entre les points A et B, le courant de diaphonie i qui circulera dans le téléphone sera de la forme :

$$(1) \quad i = k \left[W - X + Z - Y + \frac{a - b}{2} - x \right] E$$

On aura donc le silence au téléphone quand :

$$x = W - X + Z - Y + \frac{a - b}{2} = \frac{U}{2}.$$

Le condensateur x mesure donc bien le déséquilibre de capacité $\frac{U}{2}$.

On aurait des dispositions analogues pour la mesure des autres déséquilibres de capacité.

En réalité, si l'on effectue la mesure comme nous venons de l'indiquer, on s'aperçoit que la valeur de la capacité x n'est pas exactement égale à $\frac{U}{2}$; un calcul complet montre qu'elle a pour expression une fonction beaucoup plus compliquée des capacités élémentaires de la quarte et la valeur de cette fonction peut différer notablement de $\frac{U}{2}$, surtout lorsqu'on a affaire à un tronçon de câble de faible longueur et présentant des déséquilibres importants.

Il était, par suite, intéressant de rechercher les raisons de l'erreur commise et de trouver un dispositif permettant de l'éliminer. Si on reprend le problème complet de la diaphonie entre les différents circuits de la quarte, on s'aperçoit que la formule : $i = k \left(\frac{U}{2} - x \right) E$,

n'est qu'approchée et doit être remplacée par la formule exacte :

$$(2) \quad i = k_1 \left(\frac{U}{2} - x \right) E_1 + k_2 \cdot v \cdot E_2 + k_3 \cdot w \cdot E_T.$$

Dans cette formule E_1 , E_2 , E_T , désignent respectivement les tensions existant sur la 1^{re} paire, la 2^e paire et le circuit approprié au moment où l'on fait la mesure.

L'apparition des tensions E_2 et E_T quand on alimente la première paire sous la tension E_1 , est due aux déséquilibres de capacités existant entre la 1^{re} paire et la 2^e paire, ou entre la première paire et le circuit approprié; le calcul montre que ces différences de potentiel sont respectivement proportionnelles aux impédances de la deuxième paire et du circuit approprié au moment où l'on fait la mesure.

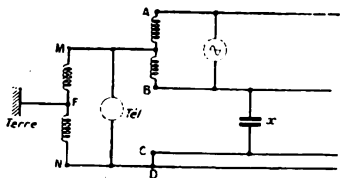


Fig. 5. — Mesure du déséquilibre :
1^{re} Paire-Combiné (U).

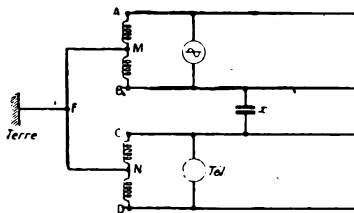


Fig. 6. — Mesure du déséquilibre :
1^{re} Paire-2^e Paire (H).

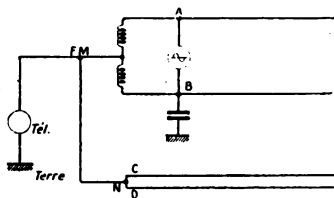


Fig. 7. — Mesure du déséquilibre :
1^{re} Paire-Approprié (u).

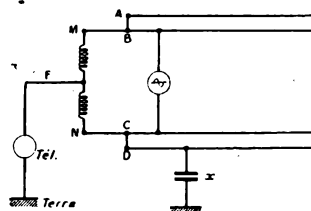


Fig. 8. — Mesure du déséquilibre :
Combiné-Approprié (w).

L'équation (2) donne à l'équilibre, c'est-à-dire pour $i = 0$:

$$(3) \quad x = \frac{U}{2} + k'_1 \cdot v \cdot \frac{E_2}{E_1} + k'_2 \cdot w \cdot \frac{E_T}{E_1}.$$

Pour mesurer exactement $\frac{U}{2}$, il suffira donc de rendre E_2 et E_T nuls; on y arrive facilement en bouclant la 2^e paire et le circuit approprié au moment de la mesure.

Le montage correspondant à cette mesure est donné par la figure 5.

En appliquant les mêmes règles à la mesure des autres déséquilibres, on obtient les montages représentés par les figures 6, 7 et 8.

Dans la pratique, les différentes connexions à établir pour effectuer chaque mesure sont réalisées par un commutateur à six positions et le condensateur de mesure x est constitué par un condensateur différentiel donnant directement le signe du déséquilibre mesuré.

ÉTUDE GÉNÉRALE SUR LES BOIS EMPLOYÉS EN ÉLECTROTECHNIQUE ⁽¹⁾

Méthode de contrôle-traitement

par M. VITTE

*Ingénieur à la Société générale de Constructions électriques et mécaniques
« Alsthom ».*

Constitution physique et chimique d'un bois : vieillissement ; hygroscopicité ; tentatives de traitement ; programme d'étude adopté à l'Alsthom ; vérification de la qualité diélectrique par la méthode des pertes ; détails sur l'application de la méthode ; résultats relevés sur les bois non imprégnés ; modes d'imprégnation actuellement pratiqués en électrotechnique ; hygroscopicité des bois imprégnés ; correspondance entre les essais suivant la méthode employée par l'Alsthom et les essais industriels. — Conclusions générales.

Le bois est un des matériaux qui a été et qui est encore certainement à l'heure actuelle parmi les plus utilisés dans toutes les branches de l'industrie.

Toutes ont recherché en lui des qualités de résistance mécanique alliées à des possibilités aisées de façonnage ; l'industrie électrique a recherché, en outre, à utiliser ses propriétés isolantes dans certaines conditions.

CONSTITUTION PHYSIQUE ET CHIMIQUE D'UN BOIS.

Nous avons emprunté les notions générales d'anatomie du bois qui vont suivre aux travaux de M. le Colonel MONIX, de la Section Technique de l'Aéronautique militaire.

Au point de vue physique le bois est une matière fibreuse organisée, essentiellement hétérogène, constituée par des cellules de formes variées, à parois d'épaisseurs diverses, cellules qui, toujours orientées suivant deux sens principaux, forment comme la chaîne et la trame d'un tissu.

(1) Communication présentée à la séance mensuelle de la S. F. E., du 2 mai 1929.

Deux sens d'orientation sont donc à considérer : le sens axial et le sens radial.

Dans le sens axial, sens de la longueur de l'arbre, les cellules sont des fibres allongées à parois épaisses constituant les organes de soutien; ou des vaisseaux à parois minces constituant des canaux de conduction de la sève ascendante; ou des cellules de parenchyme en plus faible quantité.

Dans le sens radial, perpendiculaire au premier, les cellules sont moins nombreuses, elles sont disposées en bandes minces, intercalées entre les fibres et vaisseaux qu'elles croisent à angles droits. Elles emmagasinent les matières nutritives que leur apporte la sève descendant par l'écorce. Ces bandes de cellules sont les rayons médullaires.

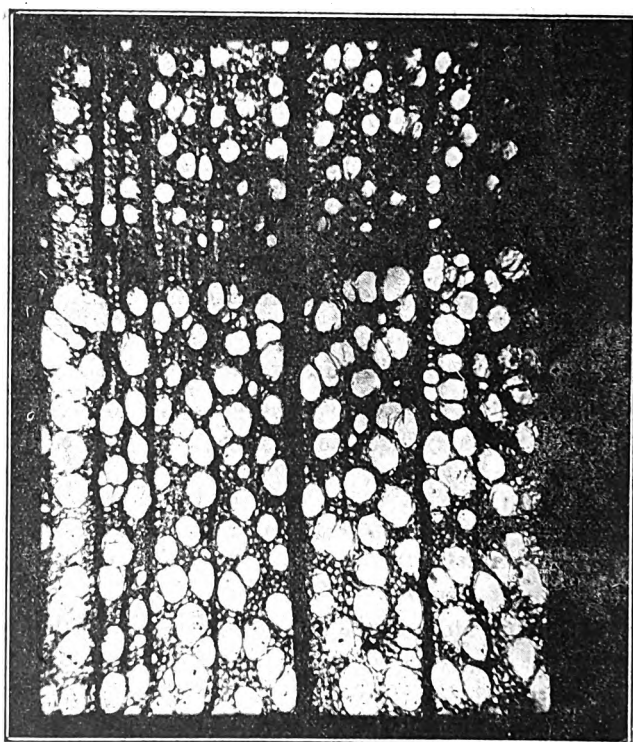


Fig. 1.

La figure 1 donne une coupe de hêtre vert (4 mois d'abatage) effectuée perpendiculairement à l'axe de l'arbre, on y remarque la section des fibres et des vaisseaux et des vues en long des rayons médullaires qui partagent la coupe en bandes étroites.

La figure 2, coupe radiale, montre les fibres et les vaisseaux dans le sens de leur longueur et la section longitudinale des rayons médullaires, dont la direction est perpendiculaire à celle des fibres..

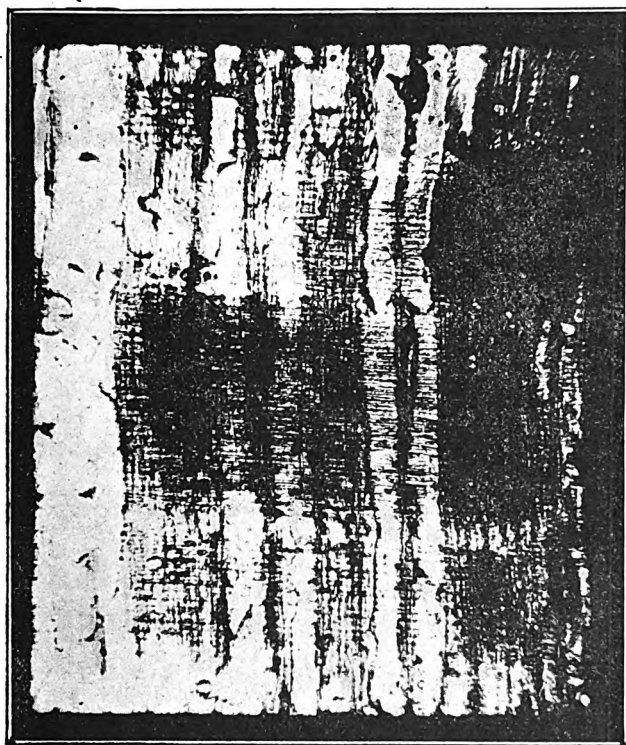


Fig. 2.

La figure 3 est une coupe tangentielle, c'est-à-dire perpendiculaire à un rayon médullaire, montre encore les fibres et les vaisseaux et, en outre, la section des rayons médullaires, dont le diamètre est de l'ordre de 2 à 3/100 de m/m et parfois moins.

Au point de vue chimique, les cellules du bois ont leurs parois constituées par la cellulose et ses dérivés. Immédiatement après leur formation, les cellules sont toutes vivantes, c'est-à-dire qu'elles contiennent des matières albuminoïdes et des sucres cellulaires, ces derniers contenant en dissolution : des corps minéraux, des corps organiques et des matières colorantes. Mais très rapidement après leur formation la plupart des cellules meurent, leur contenu disparaît et, seule, l'ossature reste. Ainsi, dans un bois les fibres et les vaisseaux sont morts,

tandis que les cellules de parenchyme et celles des rayons médullaires restant vivantes, emmagasinent et diffusent dans toute l'épaisseur de l'arbre la sève élaborée par les feuilles.



Fig. 3.

Cette sève, résultat de la transformation dans les feuilles des sucres puisés par les racines dans le sol, est constituée, en majeure partie, par de l'eau qui sert de véhicule à des matières organiques, telles que : sucre, amidon, diastase, tanin, matières colorantes, etc... destinées à nourrir l'arbre.

On rencontre donc l'eau dans le bois sous trois formes :

- 1° L'eau de capillarité libre, mobile qui remplit les vaisseaux et les canaux.
- 2° L'eau d'adhésion contenue dans les parois des cellules.
- 3° L'eau de constitution qui fait partie de la composition même du bois.

VIEILLISSEMENT DU BOIS.

Le bois vert, c'est-à-dire fraîchement abattu, renferme en moyenne de 40 à 50 pour cent d'eau soit environ la moitié de son poids. Cette quantité d'eau, répartie inégalement de la périphérie au centre de l'arbre, se modifie rapidement selon le temps d'abatage d'un bois et cette modification de degré hygrométrique, qui correspond au vieillissement du bois, est accompagnée de transformations chimiques des matières organiques et de variations volumétriques importantes.

Un bois vert, exposé plusieurs années à l'air, perd donc tout d'abord son eau de capillarité, puis son eau d'adhésion et, enfin, une partie de son eau de constitution; jusqu'au moment où son état hygrométrique général s'équilibre avec celui de l'air ambiant et en suit désormais toutes les variations.

Complètement et uniformément vieilli, ce qui demande, pour un plateau environ autant d'années qu'il y a de centimètres dans la moitié de son épaisseur, un bois conservé sous des hangars se stabilise à un degré hygrométrique variant entre 12 et 17 pour cent selon les saisons dans nos régions. Des poutres en chêne employées dans la construction intérieure d'anciennes maisons ayant plus de 100 ans, contiennent toujours de 10 à 13 pour cent d'eau.

A côté de ce vieillissement naturel à l'air libre long et coûteux, par suite des immobilisations de capitaux, on trouve actuellement couramment dans le commerce des bois vieillis artificiellement par l'ozone, ayant des propriétés analogues et parfois supérieures à celles des bois vieillis naturellement.

Dans des plateaux de très fortes épaisseurs, insuffisamment vieillis naturellement ou artificiellement, le degré hygrométrique peut être loin d'être uniforme pour toute la masse. Une éprouvette prélevée en surface pourra accuser 14 pour cent d'eau, alors qu'une autre prise à l'intérieur en accusera 20 ou 25 pour cent.

Il est donc très difficile d'apprécier rapidement le degré de vieillissement, c'est-à-dire pour nous le degré de siccité d'un bois.

Jusqu'à ce jour, plusieurs méthodes basées sur les variations chimiques des constituants du bois ont été employées. Les unes micrographiques basées sur la modification de la quantité de tanin contenue dans les bois avec le temps, les autres basées sur l'augmentation de l'acidité du bois.

Ces méthodes, que nous avons expérimentées pour le contrôle de

l'achat de nos bois, sont d'une mise en œuvre délicate, elles sont parfois en défaut et elles ne renseignent que bien imparfaitement sur le seul point vraiment intéressant dans un bois, à savoir l'état dans lequel se trouvent les matières organiques qui le constituent au point de vue de leur possibilité de réabsorption d'humidité.

HYGROSCOPICITÉ DU BOIS, TENTATIVES DE TRAITEMENT.

L'hygroscopie naturelle du bois gêne encore beaucoup d'industries où il est employé.

On a donc cherché à substituer à l'eau, une autre matière qui fixerait d'une façon définitive les qualités principales du bois en le rendant insensible à l'action de l'humidité.

Depuis plusieurs années et dans toutes les branches de l'industrie, un grand nombre de constructeurs ont donc entrepris la recherche et la mise au point de divers procédés de traitement de bois, d'emploi courant et de qualités mécaniques convenables, tel que hêtre, frêne, érable, charme, tilleul, etc...

L'Aéronautique en particulier, dans sa section technique spéciale, dirigée par le Colonel MONIN, secondé par M. TIEDREZ, a étudié longuement la question.

Ses études ont eu toutefois plus particulièrement pour but de se rendre compte exactement de l'influence des traitements sur les propriétés mécaniques du bois et sur la possibilité de le stabiliser dans sa forme.

Pour notre compte, employant dans nos fabrications électriques depuis fort longtemps des bois traités suivant des méthodes américaines, nous avons étudié complètement leur influence sur les qualités des bois.

Cette étude a été effectuée à notre Laboratoire Central de Saint-Ouen dirigé par M. KRIEGER, assisté de M. PERRIN.

PROGRAMME DE NOTRE ÉTUDE.

Notre étude a comporté les trois étapes suivantes :

1° Recherche d'une méthode de mesure permettant de nous rendre compte rapidement de la qualité diélectrique d'un bois et de suivre les variations de cette qualité.

2° Recherche de l'action des opérations de dessiccation, dessèlage, ozonisation et, en dernier lieu, d'imprégnation sur les propriétés isolantes des bois, lorsque ceux-ci sont soumis à l'action de l'humidité atmosphérique.

3° Recherche de la mise au point d'un traitement optimum qui donnerait entière satisfaction dans ses applications aux constructions électriques.

EXPOSÉ DE NOTRE MÉTHODE DE VÉRIFICATION DE LA QUALITÉ DIÉLECTRIQUE D'UN BOIS.

Il est actuellement d'usage courant de déterminer les propriétés diélectriques d'un bois par l'application d'une tension alternative élevée entre les deux faces d'une éprouvette pendant un temps déterminé.

Les chiffres couramment employés sont les suivants : 100 000 V par 30 cm éprouvette dans l'air pendant 10 minutes, électrodes constituées par un enroulement de papier d'étain, ceci pour le contrôle des pièces finies.

Pour le contrôle de la qualité des traitements (paraffine, huile de lin, bakélite, etc...) on opère généralement dans l'huile sur des éprouvettes de 25 mm d'épaisseur qui, placées entre les sphères de 12,5 mm de diamètre d'un éclateur, doivent tenir pendant une minute 75 000 V dans le sens perpendiculaire aux fibres et 50 000 V dans le sens de celles-ci.

Ces essais, qui sont bons en eux-mêmes, peuvent être cependant critiqués comme suit :

1° Dans le cas de claquage de l'éprouvette ou des pièces, il n'est plus possible de les améliorer par application d'un nouveau traitement ou prolongation de celui employé.

Il n'est donc pas non plus possible de poursuivre sur ces pièces l'étude de la variation de rigidité diélectrique pour un traitement donné ou bien il faut procéder sur un grand nombre d'éprouvettes, afin de rechercher une loi statistique, difficile à établir sur du bois, matériau essentiellement hétérogène.

2° Si l'on n'arrive pas à brûler l'éprouvette, il peut cependant s'y produire un échauffement très difficilement mesurable par suite de la mauvaise conductibilité thermique du bois.

Dans ces conditions, et considérant que l'échauffement du bois et la combustion qui peut s'en suivre, proviennent des pertes d'énergie localisées dans l'éprouvette, il a paru plus logique à M. H. KRIEGER et

PERRIN de mesurer les pertes pour connaître la valeur isolante des bois essayés.

Cet essai peut être fait à une tension n'altérant pas les pièces ou l'éprouvette, il peut donc être répété autant de fois qu'il est nécessaire sur le même échantillon, après avoir soumis celui-ci à des cycles d'humidification ou de traitement variables.

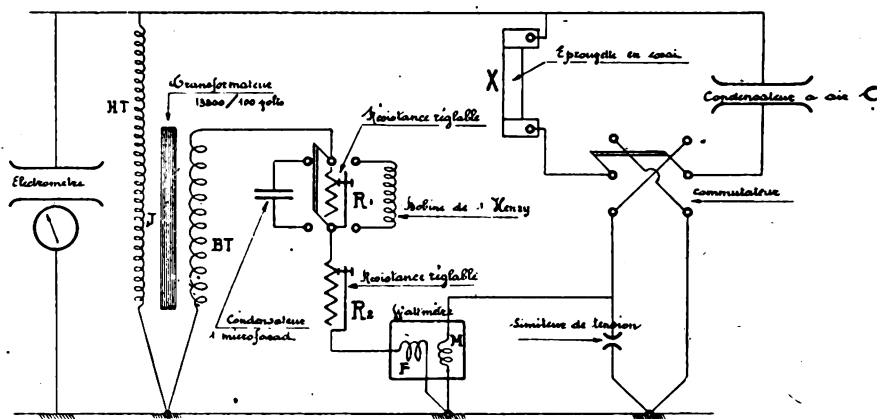


Fig. 4.

La mesure a été réalisée par la méthode du wattmètre compensé, qui est utilisé depuis longtemps pour la mesure des pertes dans les câbles. Le montage employé est représenté figure 4.

Nous nous sommes limités à une tension maximum de 15 000 V étant donné le transformateur dont nous disposons, mais le même dispositif peut être utilisé pour des tensions plus élevées.

Nous avons employé un wattmètre à miroir dont les caractéristiques étaient les suivantes :

Bobines fixes : 2 400 spires de fil 2/10 pouvant supporter 0,1 ampère.

Résistance : 147 ohms.

Bobines mobiles : cadre de 214 ohms pouvant supporter 0,03 ampère.

Dans cet appareil, la sensibilité a été sacrifiée à la robustesse, ce qui est sans grand inconvénient dans cette mesure où les lectures sont sensiblement proportionnelles aux carrés de la tension.

Sensibilité : L'appareil avait été étalonné en électro-dynamomètre, les deux bobines étant en série avec une résistance.

Si I_1 et I_2 sont les valeurs efficaces des courants en phase dans cha-

l'un des deux enroulements, la déviation en millimètres sur l'échelle placée à 1 mètre était :

$$D_{\text{mm}} = 122\,000\,000 \times I_1 \times I_2.$$

Montage en wattmètre : Pour l'application de l'électro-dynamomètre à la mesure des pertes dans un isolant, la bobine mobile M est montée comme un ampèremètre en série avec l'échantillon X.

La bobine fixe F en série avec les résistances R_1 et R_2 est montée comme un voltmètre sur la basse tension du transformateur T.

Si R est la résistance totale du circuit voltmétrique, le rapport de transformation étant 135, les pertes dans l'échantillon sont données par :

$$W = \frac{D}{122\,000\,000} R \times 135.$$

Exemple : $R = 1\,000$ ohms (ce qui correspond à l'utilisation à 100 V).

$$W = \frac{135\,000}{122\,000\,000} D = 0,0011 D.$$

La sensibilité est donc de 1,1 milliwatt par millimètre de lecture pour l'échelle placée à 1 mètre.

Cette sensibilité peut être fortement augmentée en réduisant la résistance, mais il est alors nécessaire d'opérer rapidement pour éviter l'échauffement dangereux de la bobine fixe.

Pour les mesures de pertes à très faible facteur de puissance, des erreurs importantes pourraient être produites par le déphasage du courant dans la bobine fixe, par rapport à la haute tension appliquée sur l'échantillon.

On corrige cette erreur en amenant ce courant en phase avec la tension secondaire, en alimentant simultanément en parallèle avec l'échantillon un condensateur à air C sans pertes.

Un commutateur permet d'insérer la bobine mobile, soit dans le circuit de l'échantillon, soit dans celui du condensateur.

Dans le circuit voltmétrique on shunte une partie réglable R_1 de la résistance R, soit par un condensateur de 1 micro-farad, soit par une bobine de self de 1 henry.

Quand le cadre mobile M est dans le circuit du condensateur à air C, on amène la déviation du wattmètre au zéro, en agissant sur le shunt R_1 de la capacité ou de la réactance.

Quand cette opération est faite, on introduit par le commutateur le

cadre mobile dans le circuit de l'échantillon et l'on procède à la lecture qui donne exactement les pertes.

Le transformateur, le wattmètre, le commutateur du circuit haute tension sont mis soigneusement à la terre, il n'y a donc aucun danger pour l'opérateur.

Le circuit mobile du wattmètre est protégé par un limiteur de tension qui évite que la tension aux bornes de cette bobine n'atteigne une valeur dangereuse, s'il se produit un claquage dans l'éprouvette ou le condensateur à air?

Pourquoi avons-nous opéré en courant alternatif?

Il semble, que cette méthode de mesure en courant alternatif, pourrait être aisément remplacée par une simple mesure de conductibilité des éprouvettes, effectuée en courant continu.

Nous avons essayé cette dernière méthode et nous avons trouvé qu'elle ne renseignait que très imparfaitement sur la qualité du bois.

Nous avons trouvé, en outre, que les pertes par effet Joule, calculées en se basant sur la résistance mesurée en courant continu, sont notablement inférieures aux pertes mesurées en courant alternatif.

Il suffit pour le comprendre, de remarquer que la zone *superficielle* d'un bois imprégné ou desséché présente une haute résistance pour le courant continu, même si elle est extrêmement mince, alors qu'en courant alternatif elle se comporte comme un condensateur en série.

Nous avons effectué des essais sur deux éprouvettes de charme non imprégné ayant une section de 50×50 mm.

La première éprouvette, sous une tension de 14 000 V, 50 p : s, appliquée entre deux électrodes de papier d'étain distantes de 130 mm, a donné 6,3 watts de pertes, alors que la valeur de celles-ci, calculée par RI^2 en courant continu, n'était que de 0,5 watt soit 5,2 fois moindre.

Sur la deuxième éprouvette, nous avons appliqué deux électrodes constituées chacune simplement par un seul tour de fil de cuivre.

Les pertes trouvées en courant alternatif sous 14 000 V furent de 4,5 W et en courant continu de 0,057 W, soit 78 fois moindres.

La plus grande valeur du rapport trouvée ici provient de ce que la surface des électrodes a une importance beaucoup plus grande en courant continu qu'en courant alternatif.

Détermination de la longueur à adopter pour les éprouvettes. —

Avant de mettre notre méthode en application, nous avons recherché la longueur optimum qu'il convenait à donner aux éprouvettes, eu égard à la tension d'essai que nous pouvions leur appliquer.

Les essais ont été faits sur une éprouvette imprégnée à l'huile de lin avec des électrodes constituées par une bande de papier d'étain de 20 mm de largeur et à une tension de 10 000 V 50 p : s.

Les pertes furent mesurées pour des distances entre électrodes variant entre 160 et 1 350 mm.

Calculant la résistivité apparente résultant de la mesure des pertes, en supposant que celles-ci sont dues à l'effet Joule, nous avons trouvé que cette résistivité passait par un minimum pour une longueur de 400 mm environ entre électrodes.

Pour des distances plus petites, la distribution du courant n'est pas uniforme, le centre de l'éprouvette intervenant moins que la surface; pour des distances plus grandes, la contrainte diélectrique est trop faible, pour que les pertes puissent être mesurées avec exactitude.

Nous avons donc adopté cette longueur de 400 mm pour nos essais.

Application de notre méthode au contrôle rapide de la qualité diélectrique d'un bois. — Toutes nos recherches ont été effectuées sur deux essences de bois seulement, hêtre et charme, celles-ci étant employées le plus couramment en électro-technique par suite de leurs qualités mécaniques et de leur abondance relativement grande en France.

Toutes les éprouvettes essayées avaient comme dimensions $40 \times 40 \times 500$ mm. Le sens des fibres du bois était suivant le sens de la longueur.

Toutes les mesures de pertes ont été effectuées :

- 1° Dans le sens de la longueur entre électrodes distantes de 400 mm.
- 2° Dans le sens transversal entre deux faces opposées du prisme constituant l'éprouvette.

Dans nos mesures dans le sens transversal, nous n'avons pas cru devoir distinguer le sens radial du sens tangentiel, car les pertes dans ces deux directions sont très voisines et fort inférieures à celles du sens longitudinal.

Toutes les éprouvettes de recherches de natures différentes étaient fournies en double au Laboratoire, qui pouvait ainsi constituer pour chaque lot reçu, deux séries identiques d'éprouvettes.

Pour la première, les échantillons ont été mesurés immédiatement après leur réception au Laboratoire, puis conservés dans celui-ci, pen-

dant que les éprouvettes de la deuxième série étaient étuvées à 80° C pendant 48 heures.

Ce temps écoulé, les deux séries ont été réunies dans une enceinte close contenant de l'air, saturé d'humidité (95 à 100 pour cent) et constituée par une cloche étanche renversée sur un bac contenant de l'eau.

Toutes les éprouvettes furent extraites périodiquement de cette enceinte pour la mesure des pertes.

Au cours des premières mesures effectuées sur des éprouvettes immédiatement après leur retrait de l'air humide, nous avons constaté que les pertes instables diminuaient très rapidement, mais qu'après une heure passée dans l'atmosphère du Laboratoire, cette variation était beaucoup plus lente. Nous avons donc décidé d'effectuer systématiquement toutes nos mesures sur des éprouvettes sorties depuis une heure de l'enceinte humide.

Toutes les éprouvettes étaient maintenues 10 jours dans cette enceinte et les deux séries extraites ensemble étaient replacées à l'ambiance du Laboratoire et soumises périodiquement à des mesures.

Le cycle complet peut donc être résumé comme suit :

1° Mesures effectuées sur la totalité des éprouvettes telles que reçues.

2° Division du lot d'éprouvettes en 2 séries identiques.

Première série
étuvée à 80°

Deuxième série
non étuvée

3° Totalité dans l'air humide saturé.

4° Totalité dans l'ambiance du Laboratoire.

RÉSULTATS RELEVÉS SUR LES BOIS NON IMPRÉGNÉS :

Tous les résultats furent réunis en tableaux tels que celui de la figure 5 où sont portés :

La nature du bois.

Le numéro repère de l'éprouvette.

Le sens d'essais.

La résistance R en ohms dans le circuit voltométrique.

La lecture du wattmètre en millimètres.

Les pertes exprimées en watts.

La tension d'essai en volts.

Les pertes spécifiques trouvées en admettant qu'elles sont propor-

ESSAIS 36 108 à 36 111

Vendredi 24 Août.

BOIS ESSAYÉS TELS QUELS

Nature	N° s.	Sens	Résist. ohms	Lecture mm	Pertes Watts	Tension volts	W/cm ² pour 1000 V/cm	Observations
Hêtre Pleyel 1924	1	Long.	5 000	3,5	0,044	12 000	0,88	
	2	"	"	3,5	0,044	"	0,88	
	1	"	"	45	0,56	"	9,7	
	2	"	"	32,5	0,407	"	7	
	1	"	"	20	0,25	"	4	
	2	"	"	29,5	0,3	"	5,9	
	1	"	"			"		
	2	"	"			"		
1925	1	"	"	36	0,45	"	7,8	
	2	"	"	28	0,35	"	6	
Hêtre frais	1	"	"	100	1,25	4 000	195	21,6
	2	"	"	120	1,50	"	235	
Hêtre ozonisé	1	"	"	78	0,98	12 000	17	
	2	"	"	83	1,04	"	18	
	3	"	"	105	1,32	"	23	
	4	"	"	58	0,725	"	12,6	
Charme frais	1	"	"	400	5,00	4 000	780	
	2	"	"	360	4,50	"	700	
Charme ozonisé	1	"	"	198	2,50	4 000	390	
	2	"	"	110	1,38	"	215	
	3	"	"	42	0,52	"	81	
	4	"	"	62	0,78	"	122	

Fig. 5.

tionnelles au carré de la tension, elles sont exprimées en milli-watts par cm^3 pour un gradient de 1 kV par cm.

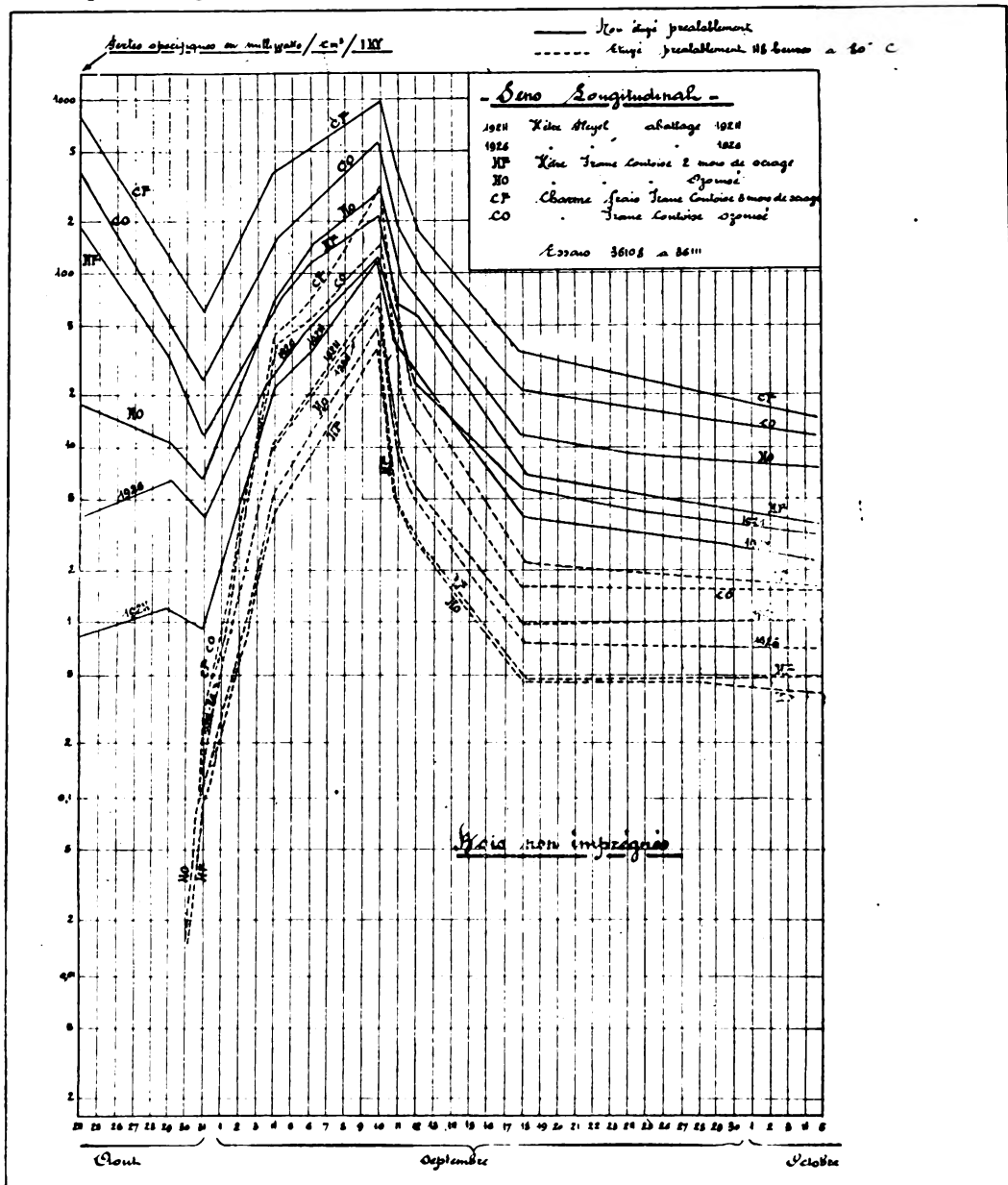


Fig. 6.

La variation générale des pertes des échantillons analysés, a été établie d'après des tableaux chronologiques analogues et reportés sur des graphiques (fig. 6).

Les graphiques ont la même allure à la valeur absolue des pertes pour le sens longitudinal et pour le sens transversal près.

Sur la figure 6, pour plus de clarté, nous nous sommes contentés de porter des résultats trouvés sur les éprouvettes suivantes :

Hêtre abattu en 1924, vieilli naturellement.

Hêtre abattu en 1926, vieilli naturellement.

Ces deux éprouvettes nous ont été fournies par la Maison Pleyel.

Hêtre frais, 2 mois d'abatage.

Hêtre ozonisé.

Charme frais, 3 mois d'abatage.

Charme ozonisé.

Ces 4 dernières éprouvettes provenaient de la Société Franc-Comtoise des Bois secs de Vesoul qui s'inspirant à la base des brevets « Otto » de vieillissement des bois par l'ozone les a complétés dans leur application par une combinaison des techniques allemande et américaine.

Analyse des courbes. — Ces courbes montrent, que les pertes mesurées varient dans des limites extrêmement étendues de 0,01 milliwatt par cm^3 immédiatement après étuvage jusqu'à 1 000 milliwatts par cm^3 après séjour dans l'air humide.

Les mesures faites dès réception des bois distinguent de suite très nettement ceux-ci.

Nous pouvons remarquer que les bois vieillis naturellement donnent moins de pertes que les bois verts ou vieillis incomplètement par l'ozone et nous distinguons également que le charme est un bois beaucoup plus hygroscopique que le hêtre. Pendant les quelques jours passés au Laboratoire, tous les échantillons eurent tendance à se mettre en équilibre hygrométrique avec l'atmosphère ambiante, les bois contenant trop d'eau en ont perdu, tandis que les bois vieux en ont absorbé.

Pour la série des éprouvettes ayant subi un étuvage, nous voyons qu'immédiatement après celui-ci tous les bois sans distinction ont donné des valeurs de pertes voisines et très petites.

En atmosphère saturée d'humidité, les pertes de tous les échantillons augmentent rapidement. Cette augmentation n'est cependant pas uniforme; on peut dire tout d'abord qu'elle est plus rapide pour les bois étuvés que pour ceux qui ne l'ont pas été. *Parmi les bois étuvés*, il est à remarquer, en outre, que l'accroissement des pertes est plus rapide dans les bois vieux que dans les bois verts. Nous croyons que ce phéno-

mène est dû à ce que l'eau réabsorbée ne l'est pas de la même façon ; dans les bois vieux (comme nous l'avons déjà dit au début), les vaisseaux, canaux médullaires et autres sont libres, l'eau peut donc y pénétrer rapidement par simple effet de capillarité ; dans les bois verts au contraire, un étuvage du genre de celui que nous avons fait subir aux éprouvettes coagule les matières albuminoïdes et sucres cellulaires qui obstruent les canaux et vaisseaux. L'eau ne peut plus être absorbée par simple capillarité pour pénétrer à nouveau dans le bois, elle ne peut le faire que plus lentement sous forme d'eau de reconstitution des matières organiques et d'eau d'adhésion, c'est-à-dire d'imprégnation des parois des cellules.

Pour les bois non étuvés, il est normal que les bois verts aient donné des pertes toujours supérieures à celles des bois vieux ou ozonés.

Dans la dernière phase de nos essais, on peut remarquer que toutes les éprouvettes saturées d'humidité ont perdu de celle-ci et que leur état hygrométrique a tendu à se mettre en équilibre avec celui du Laboratoire.

Concordance de notre méthode avec celle par pesée. — Ainsi, la mesure des pertes d'un bois par notre méthode revient à mesurer sa teneur en eau.

Jusqu'à ce jour, cette mesure était couramment effectuée par pesées et c'est par cette méthode que la Section Technique de l'Aéronautique a tracé les courbes de variation du degré hygrométrique de plusieurs bois d'essences diverses. Nous avons pu constater que ces courbes avaient exactement la même allure que les nôtres.

GÉNÉRALITÉS SUR LES TRAITEMENTS PRATIQUÉS ACTUELLEMENT EN ÉLECTROTECHNIQUE.

Je ne prétends pas exposer ici les nombreux procédés d'imprégnation des bois. Je me bornerai à vous rappeler des notions générales d'imprégnation avant de passer à l'étude que nous avons faite des bois imprégnés, et de ce que nous préconisons pour en augmenter les qualités.

Tous ces traitements ont été étudiés dans le but de substituer à l'eau dans le bois une matière inerte isolante, et ceci pour atteindre différents buts :

1° Soit pour augmenter si possible la rigidité diélectrique du bois et

la mettre à l'abri des perturbations pouvant être amenées par l'humidité atmosphérique. C'est là le cas des traitements appliqués aux bois destinés à travailler comme isolant.

2° Soit pour fixer le bois dans sa forme, lorsque celui-ci est employé comme support mécanique dans la construction d'un ensemble tel qu'un transformateur qui, terminé, doit subir un traitement complet auquel ne sauraient résister des bois non spécialement préparés.

3° Soit, enfin, pour mettre le bois à la fois à l'abri de toute variation de rigidité diélectrique et de formes mécaniques. C'est là le cas des pièces de disjoncteurs dans l'huile, des cales d'encoches de machines tournantes, etc...

On peut dire qu'il n'existe pas de méthode générale de traitement. Chacune d'elles a ses particularités qui dépendent de la matière d'imprégnation mise en œuvre, mais avec un certain nombre de traits communs qui sont les suivants :

On immerge dans la matière d'imprégnation les pièces de bois préalablement séchées au séchoir, en étuve sous vide ou par l'ozone. On laisse macérer un certain nombre de jours en élevant progressivement la température afin de chasser l'eau restant dans le bois et de faciliter la pénétration de l'imprégnant. Parfois, on fait également un vide partiel pour faciliter le dégagement de l'eau et l'on termine pendant quelques heures par une période d'imprégnation sous des pressions qui sont généralement de l'ordre de 6 à 10 kg : cm².

La mise au point d'un traitement d'imprégnation quelconque est longue, minutieuse et réserve souvent des surprises désagréables.

HYGROSCOPICITE DES BOIS IMPRÉGNÉS.

Nous avons effectué sur des bois traités à la paraffine, à l'huile de lin, à l'huile minérale, à la bakélite des essais analogues à ceux que nous avons faits sur des bois nature (fig. 7 et 8).

Pour faciliter les comparaisons, nous y avons porté les courbes données par du hêtre vert et du hêtre desséché et ozoné.

J'insisterai tout particulièrement sur ce point, que *la surface de ces bois imprégnés n'était recouverte d'aucun enduit*.

Les courbes des bois traités à l'huile de lin sont sensiblement en dessous des autres, mais elles montrent toutes nettement la possibilité de réabsorption de l'humidité par les bois traités.

Pour les bois bakélisés, nous constatons que le charme donne toujours des pertes supérieures à celles du hêtre.

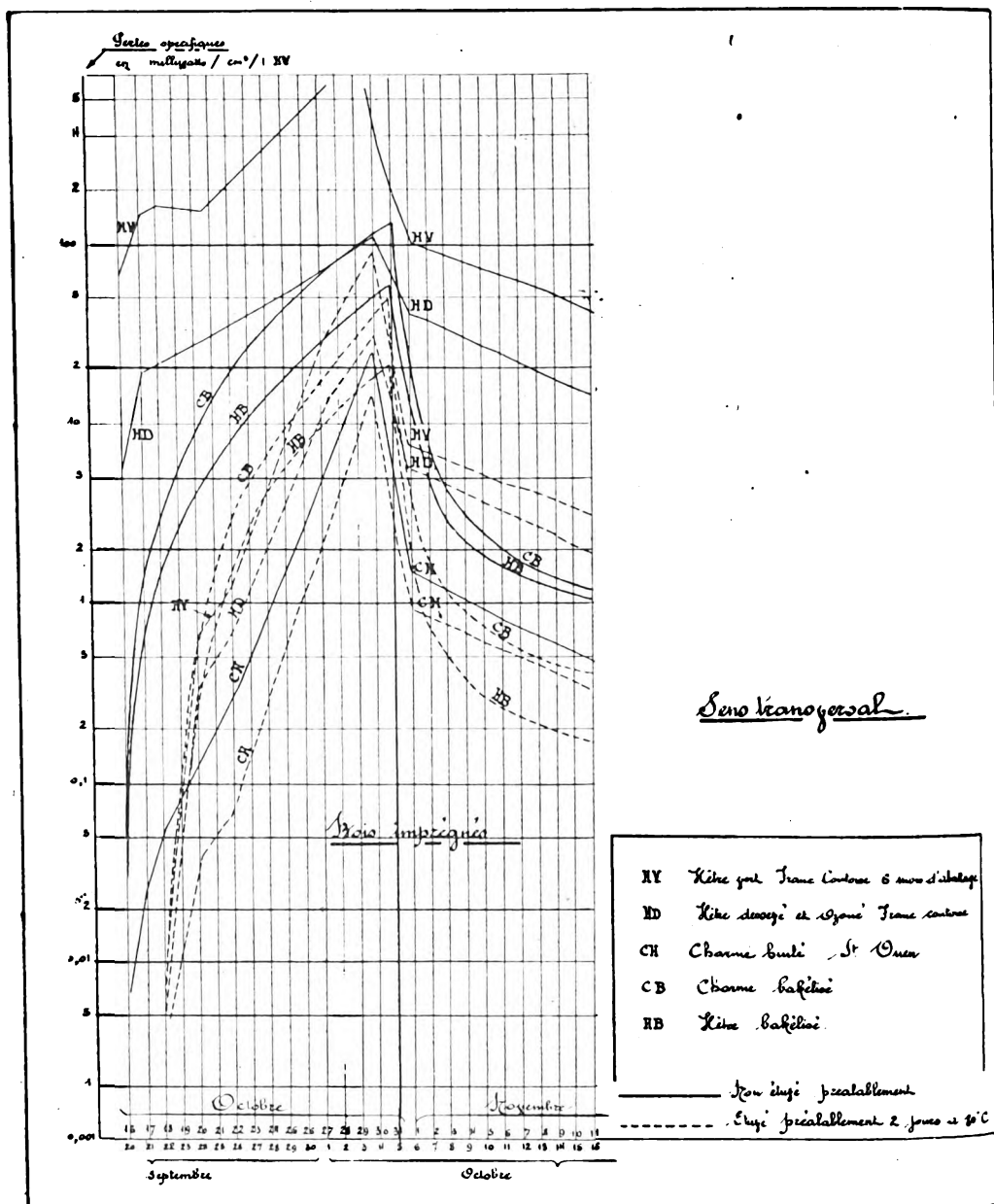


Fig. 7.

En atmosphère humide, les pertes des bois bakélisés croissent d'abord beaucoup plus vite que celles du bois traité à l'huile de lin;

au bout de 5 jours environ les vitesses d'accroissement sont les mêmes, puis les pertes du bois huilé croissent beaucoup plus vite que celles du

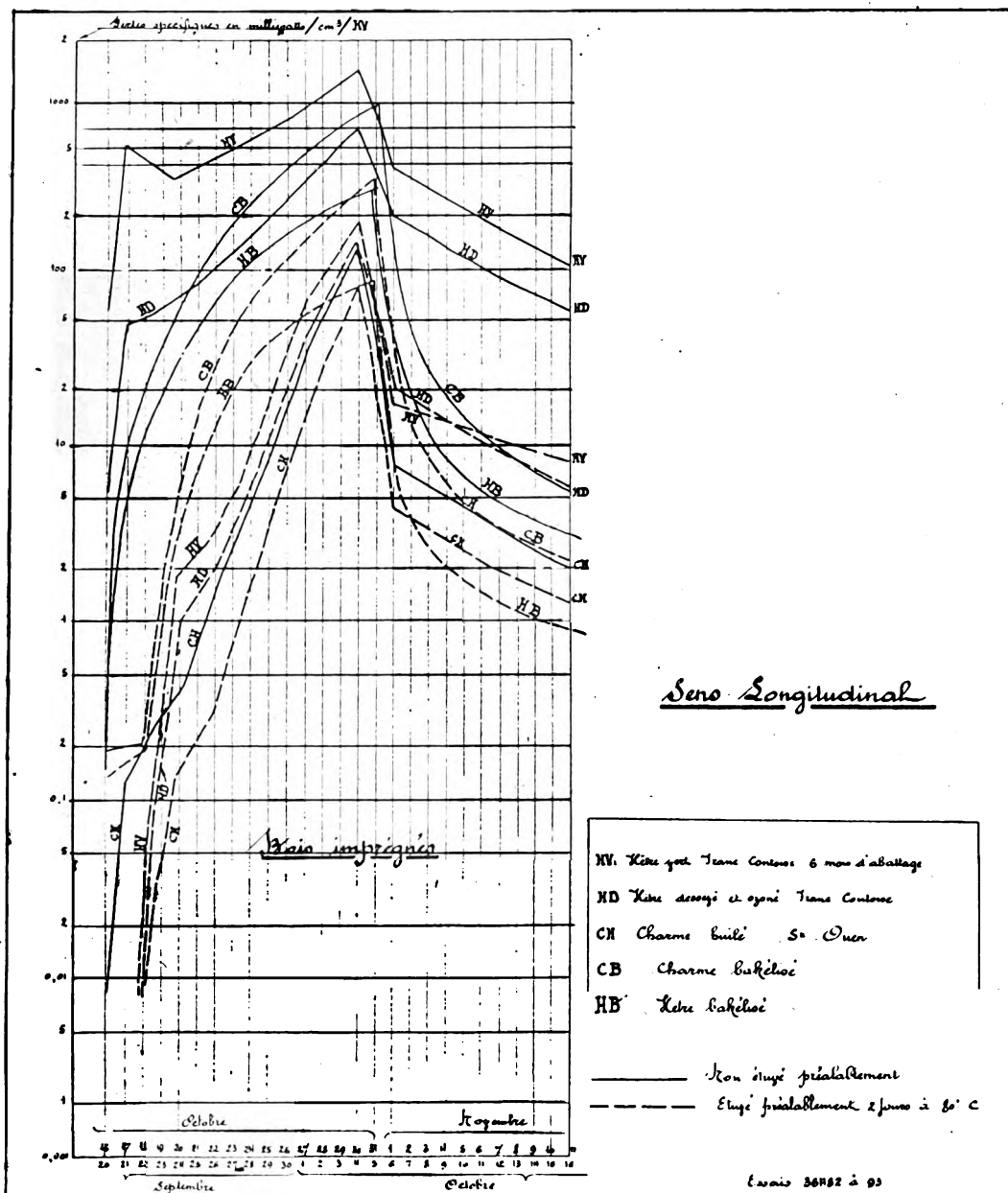


Fig. 8.

bois bakéhoi et tendent à les dépasser en valeur absolue.

Des essais effectués sur des hêtres traités à l'huile de lin et à l'huile

de transformateurs ont donné des courbes de même allure que celles du charme ; nous ne les avons pas reproduites ici.

CORRESPONDANCE ENTRE LES ESSAIS DES BOIS PAR NOTRE MÉTHODE ET LES ESSAIS INDUSTRIELS.

Je tiens à faire remarquer que les résultats trouvés par application

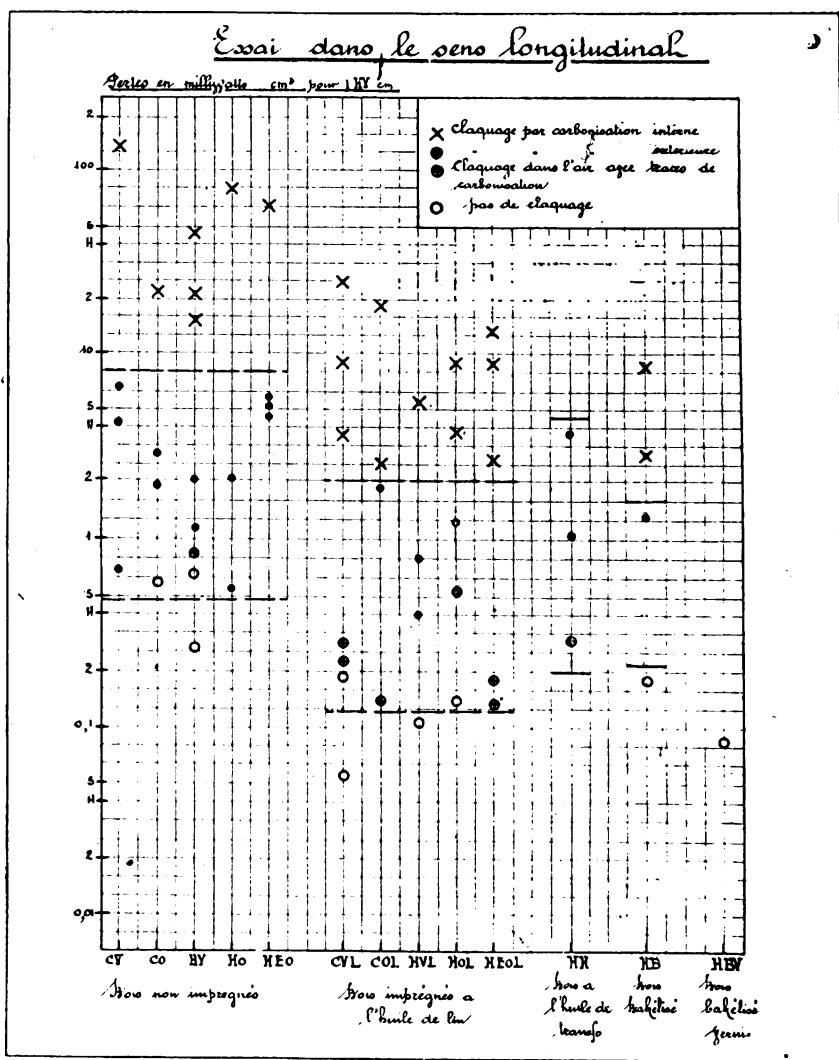


Fig. 9.

de notre méthode sont en concordance absolue avec ceux donnés par la méthode de contrôle industriel employée jusqu'aujourd'hui.

Pour bien préciser ce fait, nous avons effectué des essais sur un très grand nombre d'éprouvettes de charme et de hêtre traitées ou non.

Nous avons fait varier systématiquement l'état hygrométrique de chacune d'elles et nous avons mesuré les pertes croissantes qu'elle donnait en contrôlant, pour chaque point, la tenue de l'éprouvette sous 100 000 V appliqués par 30 cm pendant 10 mn.

Nous avons consigné l'ensemble des résultats dans le tableau figure 9, où nous avons groupé les éprouvettes en :

Bois non imprégnés : charme vert (C. V.), charme ozoné (C. O.), hêtre vert (H. V.), hêtre ozoné (H. O.), hêtre étuvé ozoné (H. E. O.).

Bois imprégné à l'huile de lin : charme vert (C. V. L.), charme ozoné (C. O. L.), hêtre vert (H. V. L.), hêtre ozoné (H. O. L.), hêtre étuvé ozoné (H. E. O. L.).

Bois à l'huile de transformateurs : hêtre (H. H.).

Bois bakélisés : hêtre bakélisé non verni (H. B.).

hêtre bakélisé verni (H. B. V.).

Pour des pertes suffisamment faibles, les bois ont tous tenu parfaitement. Puis avec l'élévation des pertes, nous avons eu successivement des décharges dans l'air, laissant des traces de carbonisation, des combustions superficielles, puis des combustions intérieures, accompagnées, pour les bois traités, d'une expulsion des matières d'imprégnation.

Le groupement homogène des points de claquage, montre bien la concordance des deux méthodes de contrôle.

On peut également tirer de ces essais la conclusion suivante, à savoir que, pour une même tenue à l'essai industriel, les pertes admissibles dans les bois imprégnés sont inférieures à celles qui peuvent être admises dans les bois non traités.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES DE NOTRE ÉTUDE.

Ainsi, l'imprégnation des bois employée seule, est insuffisante pour mettre ceux-ci à l'abri de l'absorption d'humidité.

A notre avis, cette constatation est aisément explicable par le fait que les canaux médullaires du bois sont absolument imprégnables, par suite de leurs dimensions extrêmement réduites et de la présence de cloisonnements qui les fractionnent.

Toutes les observations microscopiques de bois imprégnés, révèlent

ce fait figure 10 (agrandissement d'une coupe transversale de hêtre baké).

Tous les imprégnants isolants employés jusqu'à ce jour remplissent plus ou moins les vaisseaux et les fibres laissant intacte une multitude de petits conduits capillaires avides d'eau. Il faut ajouter que les parois mêmes des vaisseaux se laissent très difficilement pénétrer.

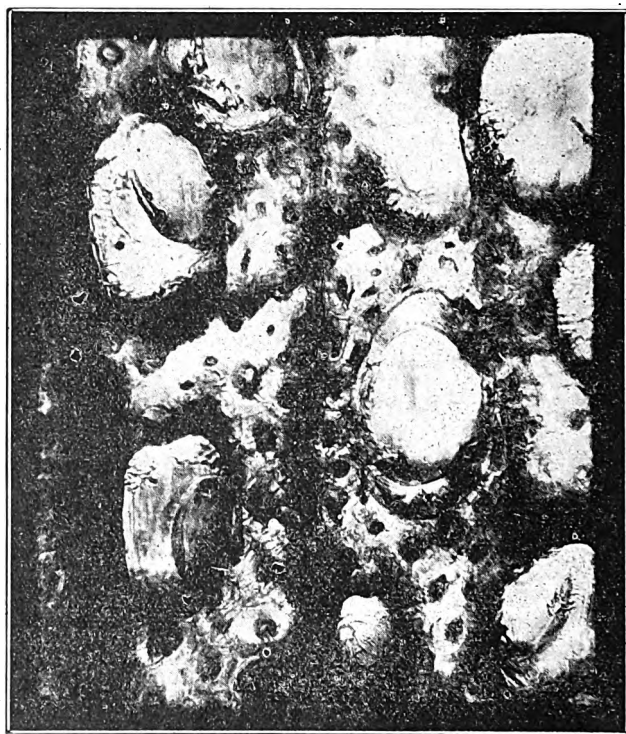


Fig. 10.

Des essais d'imprégnation de ces canaux médullaires ont été faits sous fortes pressions, les résultats obtenus ont été mauvais, les bois traités perdant toutes qualités mécaniques, par suite de l'explosion de presque tous les vaisseaux.

Ayant connaissance de l'ensemble de ces faits depuis déjà quelque temps, nous en étions arrivés à nous demander s'il était bien nécessaire de traiter les bois et si nous ne pourrions obtenir de bons résultats avec des bois convenablement séchés, puis recouverts de vernis imperméables.

Partant de charme vieilli artificiellement par l'ozone, c'est-à-dire

d'une teneur en eau entre 9 et 12 pour cent, nous avons essayé de protéger un certain nombre de pièces par recouvrement de laques indochinoises, en collaboration avec M. VERNEUIL de la Société des Laques d'Extrême Orient. Cette laque naturelle est à peu près complètement imperméable à l'eau et elle joint à cette qualité celle d'être un excellent isolant. Le seul inconvénient de ce produit est qu'il ne peut être mis en œuvre que par une main-d'œuvre immunisée naturellement contre les irritations très violentes de la peau, qui peuvent être occasionnées par les produits volatils toxiques qui s'en dégagent.

Les éprouvettes d'essais de $30 \times 30 \times 400$ mm tinrent parfaitement pendant 10 minutes une tension de 100 000 V appliqués sur 30 cm après immersion complète pendant 3 mois.

Malheureusement, il nous a été impossible de passer à l'application pratique de ce procédé. La laque d'indochine est une sorte d'émulsion contenant une notable quantité d'eau qui fait monter très sensiblement le degré hygrométrique des bois sur lesquelles elle est appliquée. Sur les petites éprouvettes d'essais un étuvage progressif poussé et maintenu à 90° C, avait permis de partir d'un bois de degré hygrométrique suffisamment bas, ce qui explique les bons résultats obtenus.

Pour l'exécution de pièces de 1 m à 2,50 m de longueur, il est très difficile de les étuver suffisamment sans les endommager avant de les recouvrir de quelques couches de laque ou de vernis.

Ainsi donc pour l'instant, à notre avis, il y a lieu d'imprégner les bois utilisés en électrotechnique, le principal avantage des traitements étant d'avoir sur les bois une action de fixation assez nette de leurs formes.

Ils permettent donc de partir de bois débités en plots. Débit qui est le plus généralement pratiqué dans l'industrie du bois et qui est de ce fait, le moins onéreux.

L'état de siccité que l'on devra exiger des bois à traiter est fonction de la rapidité avec laquelle on désire conduire les traitements. Nous avons obtenu d'excellents résultats en partant de bois complètement verts et également en utilisant des bois semi desséchés par des méthodes spéciales et ozonés, c'est-à-dire complètement vieillis artificiellement.

Nous avons étudié l'application de plusieurs vernis sur ces bois traités.

Vernis à l'alcool qui ne nous ont pas donné de bons résultats, car ces vernis se craquelent en séchant.

Laque de chine, dont j'ai signalé les inconvénients précédemment.

Vernis à la bakélite sur lesquels je m'arrêterai un instant pour en signaler les bons résultats.

Les pièces de $40 \times 40 \times 500$ mm de hêtre bakélisé recouvertes d'une couche de bakélite parfaitement polymérisée placées pendant 20 jours en atmosphère saturé d'humidité n'accusèrent aucune modification du chiffre de leurs pertes.

La couche de vernis fut alors enlevée sur une face de chacune des éprouvettes et en 2 endroits symétriques sur 10 cm^2 environ à 10 cm de chacune des extrémités. A partir de ce moment, les éprouvettes absorbèrent de l'humidité.

Les pertes, qui étaient restées constantes et égales à 0,150 milliwatts/ cm^3 pour 1 000 V/cm, dans le sens longitudinal, montèrent à 0,174, puis à 0,28, 20 jours après le grattage.

Le vernis fut enlevé sur les 2 sections droites d'extrémité, les bois replacés en atmosphère humide, les pertes montèrent rapidement à 1,52, puis à 13 milliwatts, 7 jours après ce 2^e grattage.

Les résultats donnés par ces vernis semblent très encourageants, l'expérience de leur emploi nous précisera si nous devons leur accorder toute notre confiance.

Enfin, je signalerai les peintures à base d'huile de lin et de gomme que nous employons actuellement et qui nous donnent toute satisfaction.

Je terminerai en signalant que la Commission Générale d'Etudes des Règlements du V. D. E. par les soins de sa Sous-Commission du « bois employé comme isolant » a fait paraître dans l'E. T. Z. du 14 février 1929 les règles pour l'utilisation et les essais du bois employé comme isolant qui seront en vigueur en Allemagne à dater du 1^{er} juillet 1929.

Cette publication, la première, je crois, aussi complète qui ait paru sur ce sujet, vous montre l'intérêt que l'étude approfondie de cette question a soulevé.

Observations à la suite de la communication de M. Vitte.

M. BOHNENBLUST fait remarquer que, d'après l'expérience de Brown Boveri, les bois se comportent différemment suivant leur provenance; des bois de Tchéco-Slovaquie, par exemple, ne sont pas exactement constitués comme des bois de même essence, mais provenant d'autres pays.

Lors de l'utilisation de la bakélite, le constructeur doit toujours se préoccuper des conséquences entraînées par le caractère hygroscopique de cette matière et par l'eau de condensation qui se produit au moment de la polymérisation.

L'emploi d'un vernis superficiel, appliqué sur une matière qui n'est pas susceptible de résister à la pénétration de l'humidité, présente quelques aléas, car il suffit d'une éraflure sur le vernis, ou même de craquelures causées par la dilatation, pour compromettre la qualité de la pièce.

M. A. ROTI. — Les études si complètes faites par M. VITTE sur l'imprégnation des bois et sur les essais servant à en contrôler le produit, ont été extrêmement intéressantes.

Il peut être d'un certain intérêt de constater que l'efficacité du contrôle de la qualité du bois imprégné par le wattmètre, se trouve confirmée par certaines expériences faites ailleurs.

C'est ainsi, qu'il y a 3 ans, lorsque les Ateliers de Delle se sont décidés à introduire le bois imprégné dans leurs constructions, ils ont effectué une série d'essais. Ces essais, bien que beaucoup moins complets que ceux présentés aujourd'hui par M. VITTE, ont cependant démontré la nécessité d'utiliser une méthode de contrôle de la fabrication basée sur la mesure des pertes.

Contrairement à la méthode qui a été décrite par M. VITTE, ces essais ne sont pas faits sur des échantillons, mais sur chaque pièce en bois qui sort de la fabrication. Il fallait, pour ces besoins construire un wattmètre spécial, les systèmes connus jusqu'à ce jour n'étant pas suffisamment sensibles. En effet, il s'agit de mesurer des pertes de l'ordre de 0,1 watt sous 40 000 V. Le wattmètre utilisé, consiste en un galvanomètre à miroir dont la bobine mobile est branchée sur le courant traversant la pièce de bois à essayer et dont la bobine fixe est parcourue par un courant dont le déphasage avec la tension qui produit le courant sus-mentionné est rigoureusement 0°, ce qui est obtenu au moyen d'un déphaseur à induction contrôlé par un condensateur haute tension.

M. VILLIERS. — Il semble ressortir de la conférence de M. VITTE que le bois bakélisé ne peut être utilisé à l'air libre que recouvert d'un vernis isolant. Comme ce vernis risque beaucoup d'être détérioré au cours des opérations de manutention et de montage, l'emploi, à l'air libre, du bois imprégné, comme isolant ne paraît pas très justifié.

M. LEBAPIN. — Le conférencier vient de parler de bois imprégné et il indique comme mode opératoire l'injection de la matière isolante sous pression dans du bois très sec. Cette méthode ne permet que très difficilement l'imprégnation du bois à cœur. Je l'ai constaté, il y a de nombreuses années, sur des grosses cales en hêtre paraffinées. La paraffine ne pénètre, en effet, que très peu dans le bois, et par ce moyen une cale en hêtre de 5 kg n'absorbe guère que 1 kg de paraffine.

J'ai alors été amené, après une série de remarques, à effectuer l'opération du paraffinage sur du bois vert contenant plus de 30 % d'eau. Les cales sont plongées (le fil du bois étant vertical), dans un bain dont on fait varier la température de 90° à 120°C en observant des durées de passage de la 1^{re} température à la seconde et en maintenant cette dernière pendant un certain temps.

Dans ces conditions, une cale en hêtre de 5 kg absorbe approximativement son poids de paraffine et elle se trouve imprégnée de la façon la plus complète.

Il y a lieu de noter que si le bois de hêtre utilisé n'est pas bien vert, il faut, par humidification artificielle, amener la teneur en eau entre 45 et 50 pour cent pour obtenir le même résultat que précédemment.

M. TEXIER. — Vous venez d'indiquer que les bois traités à la bakélite résistaient assez mal aux agents alcalins. Je vous fais d'abord observer que la bakélite est un nom propre qui s'applique à des produits bien déterminés. Sous ce nom, il existe d'ailleurs des produits de propriétés très diverses.

Ceci posé, je puis vous dire qu'on emploie industriellement des bakélites résistant parfaitement bien, non seulement aux agents acides, mais aussi aux agents alcalins. Il me serait facile d'en donner la preuve expérimentale à ceux que la question peut intéresser.

Sans doute, l'observation de M. l'Ingénieur de B. B. C. s'applique-t-elle à des produits d'une autre marque ou n'ayant pas en tous cas les qualités voulues. Ce n'est donc pas un défaut général des résines synthétiques, mais ce serait un défaut particulier du produit qui a été expérimenté à B. B. C.

Si j'ai bien compris, il résulte des très intéressants essais de M. VITTE :

1° que les bois imprégnés ne présenteraient pas, selon la méthode d'essai du Conférencier, des qualités extrêmement supérieures aux bois simplement séchés.

2° que les bois recouverts d'une couche de bakélite présentent une

reprise d'humidité pour ainsi dire nulle et sont équivalents à ce point de vue aux bois recouverts de laques indochinoises. Ces conclusions s'appliquent évidemment aux échantillons expérimentés par M. VITTE. Je suis tout à fait d'accord avec lui en ce qui concerne l'efficacité de la bakélite comme agent de protection du bois, non seulement pour la reprise d'humidité, mais contre bien d'autres agents physiques et chimiques.

Je ferai maintenant aux conclusions de M. VITTE, pour ce qui concerne les bois imprégnés, plusieurs réserves :

Travaillant nous-mêmes cette question depuis 10 ans, nous avons couramment obtenu par un traitement spécial d'imprégnation, l'oblitération à peu près parfaite du tissu vasculaire du bois. C'est une question assez complexe à cause de la nature colloïdale des solutions généralement employées. Nous pouvons cependant dire qu'il est possible d'obtenir des solutions colloïdales de cette nature présentant des pouvoirs osmotique et capillaire suffisamment élevés, pour qu'avec un appareillage industriel, on puisse obtenir des injections très profondes, créant sous la couche facultative de laque de recouvrement, une cuirasse tout à fait efficace contre des reprises d'humidité et même les traumatismes.

Mais la question doit être aussi envisagée d'un autre point de vue. La méthode de M. VITTE met en évidence la teneur en eau mécanique réintroduite dans le bois. Mais il me semble qu'elle ne fait pas ressortir, par contre, les différences qui peuvent provenir des modifications du tissu parenchymeux lui-même et du contenu de la cellule. Or, dans la pratique, aussi bien au point de vue électrotechnique que mécanique, ces deux éléments doivent être considérés.

Ce que nous savons par une expérimentation déjà longue, c'est que le traitement à la bakélite convenablement effectué provoque :

une fixation des matières albuminoïdes ; d'abord par l'action de l'alcool de la solution d'injection, surtout au moment de la phase évaporatoire qui a pour effet d'éliminer cet alcool.

Le formol qui se dégage ensuite pendant la condensation même (quand on emploie une résine synthétique convenable) complète encore cette action fixatrice. Ce phénomène de fixation s'exerce, non seulement sur les matières albuminoïdes des tissus encore jaunes, mais aussi sur le protoplasme des cellules vivantes.

En outre, un certain nombre de substances déposées par le courant de la sève sur le tissu sont transformées en corps résiniformes et anti-hygroscopiques.

Je ne crois pas que ces transformations soient mises en évidence par la méthode de M. VITTE. La conductibilité du circuit fibreux et cellulaire étant probablement, dans ces expériences, très faible par rapport à celle des vaisseaux; les bois essayés semblant insuffisamment imprégnés. C'est pourquoi les courbes de pertes de M. VITTE ont la même allure que les courbes de reprise d'humidité; il ne pouvait pas en être autrement.

Et cependant cette transformation du tissu et de la cellule a une grande importance. C'est ainsi que l'on constate pratiquement, en procédant à des essais de rigidité diélectrique sur des bois convenablement imprégnés, laqués ou non, que la rupture se produit sensiblement à la même tension, soit que les électrodes sont appliquées à l'extérieur et aux extrémités de l'échantillon, soit qu'elles sont appliquées aux extrémités et en plein corps de l'échantillon préalablement fendu.

En résumé :

Je dirai que les qualités remarquables de la carapace de bakélite sur les bois séchés que nous ont montrées les graphiques de M. VITTE, se retrouvent dans le corps même du bois, quand il a été convenablement imprégné aux résines synthétiques. En somme, c'est une question de densité de la résine dans le tissu vasculaire.

Mais, l'imperméabilité et la faible conductibilité du système vasculaire, plus ou moins rempli d'eau mécanique par reprise, ne sont pas les seuls éléments à considérer. Il y a aussi la conductibilité du système fibreux et cellulaire qui représente la majeure partie de la masse de bois. Cette conductibilité est bien plus faible dans les bois fixés pour les raisons que nous venons d'indiquer.

Je crois donc qu'à ce point de vue les bois bakélisés sont tout à fait différents des bois traités par les autres procédés.

M. STEINMANN. — M. VILLIERS manifeste des craintes sur la tenue du laquage qui protège le bois bakélisé.

Or, il y a lieu de remarquer que ce laquage protecteur, polymérisé à chaud, fait corps avec la masse interne de bakélite qui imprègne le bois. Le laquage est donc pour ainsi dire soudé intimement à la masse sous-jacente et forme avec elle un bloc homogène.

Pour répondre à une autre observation, je désire vous signaler que la bakélite injectée dans le bois ne l'est pas sous forme de résine pure, mais sous forme de vernis à l'acool; or on sait que l'alcool est un fixateur couramment utilisé par le traitement des coupes histologiques. En outre, les bakélites surformolées qui sont couramment utilisées ac-

tuellement, contiennent un excès de formol; ce dernier corps est un fixateur également très énergique; il possède en plus l'avantage de pénétrer avec le maximum de rapidité à l'intérieur des tissus végétaux ou animaux.

Il a quelques années j'avais eu l'occasion de soumettre à M. BLARINGHEM, Professeur à l'École Normale Supérieure, et actuellement Membre de l'Académie des Sciences, divers échantillons de bois bakélisé. M. BLARINGHEM qui a étudié très en détail l'injecton des bois, fut surpris de constater que ce bois était totalement fixé, au sens chimique du mot. Il avait lui-même étudié les procédés d'injection au bichromate sur des arbres verts. Les résultats avec les procédés de M. BLARINGHEM sont excellents; mais au point de vue diélectrique, la présence d'un électrolyte aussi actif dans le bois, le rend impropre aux usages électriques.

Si on ne désirait qu'une simple fixation du bois, l'emploi du formol pur ou mélangé à d'autres fixateurs connus, serait très avantageux; mais son emploi reste prohibitif lorsqu'il est présent à dose notable, en raison du danger de sa manipulation, l'épiderme ou d'autres muqueuses de l'opérateur se trouvant rapidement fixées et durcies d'une manière peu agréable.

D'une manière générale, nous pouvons dire que le vernis-bakélite a une action chimique importante sur les constituants du bois *avant* et *pendant* la polymérisation, les réactions produites par cette dernière, étant fortement activées par la température du traitement.

M. VITTE a signalé avec raison que la bakélite ne remplissait pas intégralement les cellules des bois injectés, ce qui permet les reprises d'humidité avec les divers inconvénients qui en résultent. Ceci est parfaitement exact et tient au procédé même d'injection : en effet, la résine bakélite est amenée à l'intérieur des cellules sous forme de solution alcoolique; l'alcool étant chassé ensuite par un traitement approprié, laisse évidemment des vides dont le volume est au moins égal à ceux qu'il occupait. Il faut remarquer à ce sujet qu'une partie de cet alcool reste en combinaison, à l'intérieur de la cellule, avec certains sucres cellulaires.

Les vides en question ont d'ailleurs l'avantage de laisser au bois une grande partie de sa flexibilité; si on veut supprimer complètement ou à peu près ces vides, on peut y arriver soit par surinjection soit par écrasement du bois. Dans ces conditions, on obtient des produits d'un nouvel aspect qui possèdent des propriétés très intéressantes. Il y a là pour le bois bakélisé, des avantages qui permettent de satisfaire à un certain nombre de desiderata de l'Electrotechnique.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Les anciens élèves du Polytechnikum de Zurich à la maison d'Ampère à Poleymieux.

A la suite du Congrès des anciens élèves du Polytechnikum de Zurich, tenu récemment à Paris, un groupe important de personnalités du monde industriel Suisse profitait de son passage à Lyon pour rendre hommage au souvenir du grand physicien français Ampère et visiter, à Poleymieux, sa maison familiale, propriété de la Société française des électriciens.

Les congressistes furent reçus le 28 septembre en gare de Lyon-Perrache par quelques membres du groupe du Sud-Est de la Société française des électriciens.

Un auto-car les emmena à Poleymieux par Saint-Dizier-au-Mont-d'Or.

A la maison d'Ampère, M. Dumont, Secrétaire général du Groupe du Sud-Est de la S. F. E., en l'absence du président excusé, reçut les visiteurs.

En quelques mots choisis, M. Dumont leur souhaita la bienvenue et leur donna quelques détails précis sur la vie d'Ampère dans son village. Il leur exposa succinctement l'œuvre entreprise à la mémoire du savant par la Société française des Electriciens, qui grâce à un don généreux, a pu acquérir l'ancienne propriété d'Ampère et la faire restaurer. Le projet de musée, en cours de réalisation, pour faire revivre l'œuvre du physicien dans sa maison de Poleymieux, fut l'objet d'une mention spéciale.

Les visiteurs parcoururent ensuite les appartements et examinèrent à loisir les photographies de documents autographes d'Ampère exposés dans diverses pièces.

A l'issue de cette cordiale manifestation, on se rassembla autour d'une table dressée sur la terrasse et M. Dumont porta un toast en l'honneur des invités et à la prospérité du Polytechnikum de Zurich.

Les anciens élèves du Polytechnikum de Zurich, se rendirent enfin au pied du monument d'Ampère, où ils purent se recueillir un instant.

Ils furent ramenés à Lyon, par les bords de la Saône, et se déclarèrent enchantés de leur visite et de la réception qui leur avait réservée.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ

PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ.

Machine Elettrica, par BARBAGELATA Angelo, ingénieur, professore al Politecnico de Milano, édité par la Libreria editrice Politecnica de Milano. Un volume broché $25 \times 18^{\text{cm}}$ de 254 pages, 203 figures. — Don de l'Auteur. Prix : 35 Lires.

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

Eclairage, par L. GALINE et B. SAINT-PAUL. Édité par DUNOD, 92, rue Bonaparte, à Paris. Un volume $19 \times 12^{\text{cm}}$ de 828 pages, 372 figures, broché, année 1929. Prix : 98 francs. — *Don de l'Editeur.*

CANALISATION. — DISTRIBUTION GÉNÉRALE. — TRACTION.

Übertragungs-technik, par R. WINZHEIMER. Édité par Verlag von R. OLDENBOURG, à München und Berlin. Un volume $23 \times 17^{\text{cm}}$ cartonné, 233 pages, année 1929. Prix : 12 marks. — *Don de l'Editeur.*

RECHERCHES PHYSIQUES. — APPAREILS DE MESURE.

Newton, Maupertuis et Einstein, Réflexions à propos de la relativité, par F. PRUNIER. Édité par Albert Blanchard, 3 et 3^{bis}, Place de la Sorbonne, à Paris. Un volume $22 \times 14^{\text{cm}}$ de 80 pages, broché, année 1929. Prix : 12 francs. — *Don de l'Editeur.*

La Nouvelle Mécanique des Quanta, par Georges BIRTWISTLE. Édité par Albert Blanchard, 3 et 3^{bis}, Place de la Sorbonne, à Paris. Un volume $25 \times 16^{\text{cm}}$, broché, 336 pages, année 1929. Prix : 75 francs. — *Don de l'Editeur.*

Principi Scientifici di Elettrotecnica, par Luigi LOMBARDI, professore di elettrotecnica nella R. Scuola di ingegneria di Roma. Édité par Raffaele Pironti, à Napoli. Un volume $25 \times 18^{\text{cm}}$ broché de 530 pages, année 1928. Prix 68 lires. — *Don de l'Auteur.*

Empfindliche Galvanometer für Gleich und Wechselstrom, par le Dr Otto WERNER. Editeurs Walter de Gruyter et Cie, à Berlin. Un volume $24 \times 16^{\text{cm}}$ de 210 pages, 1928, broché. — *Don des Editeurs.*

ENSEIGNEMENT.

Corso teorico-pratico di Elettrotecnica, par Luigi LOMBARDI, professore di elettrotecnica nella R. Scuola di ingegneria di Roma. Édité par Dottor Francesco VALLARDI, à Milano. Deux volumes brochés de $25 \times 17^{\text{cm}}$, de 642 pages, année 1926, prix 100 lires ; de 870 pages, année 1926, prix 70 lires. — *Don de l'Auteur.*

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

La construction économique de la machine électrique, par Milan VIDMAR, professeur à l'Université de Ljubiana (Serbie), traduit de l'allemand par D. SCHERPSE, ingénieur diplômé de l'Université de Lausanne. Un volume 16^{cm} × 25^{cm} de 133 pages 8 figures 1923 Prix : broché, 25 fr Dunod, éditeur, 47 et 49 quai des Grands-Augustins, Paris, 6^e. — Don de l'éditeur.

Cet ouvrage, écrit en 1918, répondait alors à la nécessité urgente où l'on était d'économiser au maximum les métaux tels que le cuivre et l'aluminium, absorbés par les fabrications de guerre.

L'auteur a pensé qu'il convenait, pour atteindre ce but, de créer une théorie des formes, dans laquelle la forme géométrique de la machine a une influence prépondérante sur son poids et sur son prix et il a établi un certain nombre de lois, lois de la machine croissante, principe de la proportion uniforme, loi de répartition des pertes, etc., qu'il a appliquées à la construction d'un transformateur sec de 10 kVA d'un transformateur de 16 000 kVA et du projet d'un moteur asynchrone de 50 ch.

ÉLECTROCHIMIE. — ÉLECTROMÉTALLURGIE.

Leçons sur la conductibilité des électrolytes, professées à la Sorbonne en 1927-28 par E. DARMOIS. Un volume 17^{cm} × 25^{cm} de 145 pages et 78 figures. 1929. Prix : 20 fr Editeur : librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris, 5^e. — Don de l'éditeur.

L'auteur expose les résultats expérimentaux et théoriques concernant l'électrolyse, en rappelant, au début de ses leçons, les lois fondamentales de la conductibilité métallique.

Le chapitre premier est consacré aux « Lois de Faraday », et à la « dissociation électrolytique ».

Le chapitre II traite de la « mobilité des ions » et le chapitre III des « propriétés osmotiques des ions ».

« Les forces électromotrices » et les « théories de la pile » sont étudiées dans le chapitre IV.

L'étude et la « mesure des potentiels d'électrodes » font partie du chapitre V.

La polarisation des électrodes est traitée dans le chapitre VI.

Dans le chapitre VII, on expose la « théorie de la dissociation complète » et on l'applique au « calcul du coefficient d'activité et de la conductibilité ».

Enfin, dans le chapitre VIII, on étudie « la conductibilité des sels fondus et des cristaux ».

APPAREILLAGE.

Leichtmetall in der electrotechnik. — Vereinigte Aluminiumwerke Aktiengesellschaft Lautawerk. Opuscule 14^{cm} × 21^{cm} de 29 pages 12 phototypies.

Consacré à l'aluminium et à ses applications aux Industries électriques, notamment à la construction des lignes de transport, de l'appareillage électrique des lignes, des machines et appareils électriques.

MESURES.

Les Compteurs d'électricité. Théorie, construction, installation, tarifications, par R. M. FICHTER, docteur ès-sciences et ingénieur-électricien de l'Université de Nancy, licencié en droit, arbitre rapporteur près le Tribunal de commerce de la Seine, expert près les Tribunaux. Préface de M. A. MAUDUIT, directeur de l'Institut Electrotechnique et de Mécanique appliquée de Nancy. 2^e édition refondue et augmentée. 1929. Un volume 16^{cm}5 × 26^{cm} de 372 pages, 238 figures, V graphiques. Éditeur : Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris, 6^e. — Don de l'éditeur.

Cet ouvrage est consacré à l'étude des divers genres de compteurs d'électricité en usage sur les réseaux de distribution :

1^o Compteurs ampère-heure-mètres à courant continu (compteurs électrolytiques, compteurs non freinés ou freinés, compteurs à mercure).

2^o Compteurs watt-heure-mètres à courant continu.

3^o Compteurs d'induction monophasés et triphasés. Une théorie élémentaire et une théorie plus complète due à M. Iliovici, une description des principaux types, un chapitre spécial consacré à l'installation, l'étalonnage, le réglage et les essais de ce genre, constitue l'étude de cette catégorie d'appareils extrêmement répandus dans les distributions d'énergie électrique, du fait que ces distributions se font presque exclusivement par courants alternatifs.

4^o Compteurs horaires et compteurs à prépaiement, très en faveur dans un grand nombre d'installations actuelles

5^o Compteurs oscillants et compteurs balanciers, longs ou courts, encore recherchés dans certains cas pour leurs qualités de sensibilité et de précision.

L'auteur donne de nombreux détails sur la construction des compteurs, sur les divers modes de tarification (dégressives, doubles et triples, binômes, tarifications tenant compte du facteur de puissance, etc.), ainsi que sur les compteurs spéciaux qui s'y rapportent (compteurs à dépassement, à indicateur de maximum, à enregistreur de pointes, compteurs de puissance réactive, etc.)

La partie qui se rapporte à l'étalonnage et au réglage des compteurs, aux modes modernes de tarification, à leurs compteurs spéciaux, à l'organisation du dernier des compteurs est celle qui a subi dans cette 2^e édition les plus profondes modifications.

Le dernier chapitre contient divers documents administratifs. l'arrêté du 18 janvier 1920, notamment, fixant les conditions d'approbation des types de compteurs, avec les dispositions complémentaires du 8 août 1922 et un extrait de la police d'abonnement des secteurs électriques parisiens.

La compétence particulière de l'auteur dans cette branche de la technique de l'électricité donne à cet ouvrage une importance que les Ingénieurs, les Industriels et tous ceux qui emploient l'énergie électrique sauront apprécier.

AIDE-MÉMOIRE. — FORMULAIRES. — MANUEL.

Comment on devient fraiseur, par R. CHAMPLY, ingénieur-mécanicien. Un vol. in-8 broché de 269 pages, avec 245 figures et de nombreux tableaux de calculs faits. 1929. Prix : 25 fr ; franco par la poste : France 27 fr., Etranger 30 fr. Desforges, Girardot et C^{ie}, éditeurs, 27 et 29, quai des Grands-Augustins, Paris, 6^e.

Ce livre est écrit pour former et instruire les ouvriers fraiseurs, outilleurs et régleurs de machines à fraiser.

C'est un volume indispensable aux mécaniciens et aux ouvriers spécialisés dans le montage et le réglage des machines-outils.

Royal Air force drill and ceremonial. and edition, december 1926. Promulgated for the information and guidance of all concerned by Command of the air Council. 1929. Prix 2 sh. 6 p. Published by his Majesty's Stationery office, London.

Ce règlement de manœuvre est destiné aux troupes anglaise d'aviation.

Manuel du dessinateur industriel. — I *Principes géométriques et applications. Tracés et calculs*, par Numa MORISE, professeur honoraire de dessin et de technologie de l'Ecole nationale d'Arts et Métiers de Châlons-sur-Marne. Un volume in-16 de 608 pages, avec 110 figures, 1929. Cartonné : 30 fr. — Editeur : J. B. Baillière et fils, rue Hautefeuille, Paris (VI^e). (Don de l'éditeur).

Ce manuel qui fait partie de la « Bibliothèque Professionnelle » est destiné à la formation technique du dessinateur industriel. Son plan et sa rédaction sont en concordance avec les programmes d'instruction des Etablissements d'enseignement technique tels que ceux des Ecoles pratiques d'industrie ; il s'adresse à l'ouvrier ou à l'apprenti qui veut devenir dessinateur.

ENSEIGNEMENT.

Système M. T. S., obligatoire depuis le 5 août 1920 (loi du 2 avril 1919), par J. FRÉCAUT, professeur honoraire de physique à l'Ecole J.-B. Say, examinateur à l'Ecole J.-B. Say et au Collège Chaptal, membre des Commissions d'examen de la Seine. Un volume 12^{cm} × 19^{cm} de 88 pages, 1922. Prix : 7 fr. 50 — Editeur : librairie Vuibert, 63, boulevard Saint Germain, Paris (5^e). (Don de l'éditeur).

Cet ouvrage présente les « Nouvelles unités légales commerciales et industrielles » ; il s'adresse particulièrement au Personnel des Enseignements primaire supérieur et secondaire ; aux candidats aux Ecoles d'Arts et Métiers, de Physique et Chimie, etc. ; aux élèves des Instituts industriels et des Ecoles pratiques d'Electricité ; aux Intituteurs et Institutrices ; aux Elèves des Ecoles normales primaires et des Ecoles normales supérieures de Saint-Cloud et de Fontenay ; aux aspirants et aspirantes au Brevet supérieur ; aux candidats au Professorat, etc.

Leçons sur les alliages métalliques, par J. CAVALIER, professeur honoraire à la Faculté des Sciences de l'Université de Rennes, Recteur de l'Académie de Toulouse. Deuxième édition. Un volume 16^{cm} 5 × 25^{cm}, 466 pages, 124 figures dans le texte, xxiv planches hors texte. Prix : 36 fr. Editeur : Librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris, 5^e.

Cet ouvrage est le développement d'une série de leçons faites à la Faculté des sciences de Rennes, pour les candidats à l'« agrégation des sciences physiques », les Etudiants en « Chimie générale » et en Chimie industrielle.

Il comprend deux parties : La première est une étude de la Constitution, des alliages, des procédés généraux, de leur préparation ; de leurs propriétés physiques et mécaniques.

Dans la seconde partie les méthodes générales d'investigation et d'étude sont appliquées à des exemples concrets choisis parmi les alliages les plus employés de l'industrie : alliages ferreux, laitons, bronzes, alliages d'aluminium, de tungstène, etc...

Les planches hors textes comprenant des microphotographies mettent en évidence les constituants simples et complexes qui les composent.

Les théories les plus nouvelles de la « Chimie des corps solides » notamment les lois de l'équilibre chimique sont exposées dans cet ouvrage : il présente de ce fait un grand intérêt non seulement pour l'étudiant, mais aussi pour le métallurgiste qui produit l'alliage et pour l'industriel qui doit savoir comment il faut le traiter et l'utiliser.

Cours élémentaire d'électricité industrielle, professé aux cours du soir de la mairie du IV^e Arrondissement de Paris, par H. BERNARDEAU, licencié des sciences, ingénieur E. S. E. Un volume 12,5^{cm} × 21^{cm}, de 194 pages, 173 figures. — Publié par le Syndicat général des Installateurs électriciens français, 25, boulevard Malesherbes, Paris. (Don de l'auteur).

Ce cours élémentaire d'électricité industrielle est la reproduction des leçons professées par l'auteur aux cours du soir organisés par la Fédération des mécaniciens et électriciens des chemins de fer dans les diverses Mairies de Paris.

Cet ouvrage de vulgarisation s'adresse aux monteuses et contremaîtres désireux d'acquérir les notions théoriques indispensables à l'exercice de leur profession.

Leçons de Chimie physique, par P. Maurice VÈZES, professeur de chimie à l'Université de Bordeaux, avec une préface de M. G. Urbain, membre de l'Institut, professeur à la Sorbonne. Un volume 16^{cm} × 25^{cm} de 545 pages et 293 figures. 1927 Prix : 50 fr. Editeur : librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris, 5^e. — Don de l'éditeur.

Le livre I intitulé *Atomes et molécules*, comprend : Les définitions et lois fondamentales, la détermination des poids atomiques et des poids moléculaires.

Le livre II consacré à *l'électrochimie* traite des Electrolytes, du Transport des ions, des Forces électromotrices, de l'Energie des piles, de l'Electrolyse et des atomes.

Le livre III traite de la *vitesse des réactions* et de la catalyse.

Le livre IV se rapporte aux *équilibres chimiques*, systèmes univariants, invariants, bivariants à un seul constituant et bivariants binaires: trivariants, quadri-variants et faux équilibres.

Un index bibliographique est placé à la fin du volume.

Les Ingénieurs et les Industriels, principalement les chimistes et les métallurgistes trouveront les plus précieux enseignements dans ce savant ouvrage.

Problèmes de Physique et de Chimie, à l'usage des élèves de mathématiques spéciales, par Ch. RIVIÈRE, ancien élève de l'Ecole Normale, docteur ès sciences physiques, professeur au Lycée Saint-Louis. Un volume 14^{cm} × 23^{cm} de 296 pages avec figures, comprenant 481 énoncés de problèmes avec leurs solutions. 4^e édition, 1922 Prix : 22 fr. Editeur : librairie Vuibert 63, boulevard Saint Germain, Paris, 5^e. — Don de l'éditeur.

Les problèmes contenus dans ce recueil se rapportent en ce qui concerne la physique :

à *l'optique*, éclaircissement, réflexion, réfraction, lentilles, dispersion, instruments ;

à *la pesanteur et à l'hydrostatique*, équilibre des solides, chute libre, plan incliné, pendule, hydrostatique, capillarité, élasticité des gaz ;

à *la chaleur*, dilatation et thermométrie, propriétés des vapeurs, calorimétrie ;

à *l'électricité et au magnétisme*.

Les problèmes de chimie se rapportent aux métalloïdes. Un grand nombre des problèmes compris dans cet ouvrage ont été proposés aux concours de nos grandes Ecoles.

Les solutions ne sont indiquées que d'une manière sommaire, et le lecteur ne doit y chercher, en général, qu'une vérification de ses calculs, et dans les cas les plus difficiles, une indication de la méthode à suivre.

IL Y A 30 ANS

I^o — Réunion ordinaire mensuelle du 8 Novembre 1899.

Présidence de M. J. VIOLLE, Président.

M. G.-E. O'KEENAN présente le moteur O'K, constitué essentiellement par un induit tournant dans le champ d'un aimant permanent ; le rendement de l'appareil étant maximum quand sa charge est nulle et sa force contreélectromotrice égale à la différence de potentiel appliquée à ses bornes, il suffira de réduire au minimum les pertes et les frottements pour que le courant consommé soit presque nul. Le moteur pourra donc fonctionner comme heure-mètre ou horloge électrique alimentée par une pile de quelques volts, comme volt heure-mètre ou watt-mètre pour distributions à intensité constante ; comme ampère heure-mètre ou watt-mètre pour distributions à potentiel constant. De nombreuses expériences exécutées par le conférencier montrent la sensibilité, l'exactitude et les multiples applications possibles de son appareil.

II^o — Bulletin.

Ce numéro contient une communication faite par M. RAVEAU à la séance du 3 mai 1899 sur la variation de la résistance du platine en fonction de la température. Il résulte de travaux exécutés en Angleterre, notamment par MM. CALLENDAR et GRIFFITHS et au Pavillon de Breteuil, par M. Ch. GUILLAUME, que les indications des thermomètres à platine coïncident, à un haut degré d'approximation, avec celles des thermomètres à azote et que les premiers peuvent être employés en toute sécurité pour le thermomètre de haute précision comme pour la thermométrie industrielle.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

- Réunion supplémentaire du 11 octobre 1929, commune avec la Société des Ingénieurs civils de France, p. 1259.
Réunion ordinaire mensuelle du 9 novembre 1929, p. 1261.
Admissions de Membres titulaires, p. 1261.
Membres décédés, p. 1263.
Distinctions accordées aux Membres de la S. F. E., p. 1263.
Annonces diverses, p. 1264.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

- Expériences sur la Production du froid par l'Effet Peltier (M. TURRETTINI, p. 1267. — Observations de M. BETHEAOD, p. 1280. — Forces hydrauliques de l'Afrique Equatoriale française (M. DARNIAULT), p. 1283. — Observations de M. GRATZMULLER, p. 1291. — Sur un procédé permettant la détermination des propriétés magnétiques des tôles aux faibles inductions en courant alternatif (MM. R. JOUAUST et P. WAGUET), p. 1293. — Accouplement magnétique sans frottement (M. PESTARINI), p. 1298.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS :

- Attribution du prix George Montefiore pour 1929, p. 1307.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 1308.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1309.

IL Y A TRENTE ANS, p. 1312.

TABLE MÉTHODIQUE DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE TOME IX (4^e série), p. 1313.

TABLE DES NOMS D'AUTEURS CITÉS DANS LE TOME IX (4^e série), p. 1323.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

4^e série, tome IX, Décembre 1929, n° 100.

COMPTES RENDUS DES REUNIONS

REUNION SUPPLÉMENTAIRE

du vendredi 11 octobre 1929

organisée en commun avec la Société des Ingénieurs civils de France.

Présidence de M. MOUTIER,

Président de la Société des Ingénieurs civils,

assisté de M. DAGUERRE

Vice-Président de la Société Française des Electriciens.

M. MOUTIER adresse des souhaits de bienvenue à M. DAGUERRE et donne la parole à M. P. RIEUNIER qui expose la marche dans la région parisienne, de l'unification de la fréquence du courant distribué.

Le conférencier rappelle que l'interconnexion générale des réseaux, dont la nécessité est apparue dès 1916, a imposé l'unification préalable des fréquences.

En 1919, la puissance totale installée était de 450 000 kW dont 35 pour cent à la fréquence de 25 p : s, 38 pour cent à 41 2/3 p : s, 27 pour cent à 50 et 53 1/3 p : s.

Au 1^{er} octobre 1928, la puissance installée atteignait 1 140 000 kW, dont 8,5 pour cent à 25 p : s, 1 pour cent à 41 2/3 et 90,5 pour cent à 50 p : s.

Au 1^{er} juillet 1930, 6 pour cent seulement représentant la puissance du réseau de chemin de fer de l'État, resteront à 25 p : s et 94 pour cent seront à 50 p : s. La diversité des fréquences adoptées par les premiers secteurs s'explique aisément car, à cette époque, on n'était pas assuré de pouvoir faire tourner en parallèle les groupes d'une même Centrale, on ne pouvait donc songer encore à l'interconnexion des réseaux.

Lorsque, en 1919, cette opération fut décidée, on aurait pu recourir à l'emploi de groupes rotatifs, mais comme M. RIEUNIER l'a montré, en 1927, devant la conférence des Grands Réseaux, les prix d'établissement et d'exploitation de tels groupes, rendent cette solution inapplicable quand les puissances à manier sont considérables.

Il était donc nécessaire d'unifier les fréquences. Le conférencier projette un film montrant sur une carte de la région parisienne, la progression du travail. On a décidé de conserver, parmi les éléments des réseaux existants, tout ce qui pouvait l'être, formes de courant, tensions, câbles de distribution, transformateurs, installations intérieures. Les groupes générateurs ont été rebobinés, et il a suffi d'ajouter aux réseaux existants 2 500 m seulement de câbles souterrains.

La modification du matériel récepteur des abonnés présentait des difficultés particulières.

Sur les réseaux à 25 p : s le matériel mécanique n'a pas été modifié : il a donc fallu remplacer ou rebobiner tous les moteurs ; par contre, étant donné que les moteurs à 41 2/3 p : s conservent à 50 p : s un fonctionnement très satisfaisant, on a pu se contenter, sur les réseaux correspondants, d'adapter le matériel mécanique à la vitesse accrue : la modification comportait un simple changement de poulie dans le cas d'une transmission, mais pouvait aller jusqu'au changement complet de l'organe mécanique dans le cas de pompes centrifuges.

L'expérience ainsi acquise dans les opérations de changement de fréquence, a porté à la fois sur une région agricole et sur une région industrielle où beaucoup d'appareils récepteurs, machines à calculer, machines domestiques, etc., posaient, en raison de leur importance pour l'usager et malgré leur faible puissance, des problèmes ardu. Au cours de ces travaux, qui ont duré dix ans, 16 200 machines, d'une puissance totale de 77 000 ch, ont été remplacées sur les réseaux à 25 p : s et 57 000 autres, d'une puissance totale de 328 000 ch, ont été adaptées sur les réseaux à 41 2/3 p : s.

Les réseaux de la région parisienne peuvent maintenant être alimentés par l'une quelconque des sources d'énergie existante. Le conférencier fait hommage de ce résultat à M. Ernest MERCIER qui, après avoir conçu la solution du problème, a su y rallier tous les intéressés. Ceux-ci, administrations publiques, distributeurs, abonnés, constructeurs, ont apporté le meilleur esprit de concorde à l'exécution de cette tâche.

Après que M. MOUTIER eût félicité et remercié le conférencier, M. DAGIERRE ajouta que, grâce à la compétence et au dévouement de M. RIEUNIER et de ses collaborateurs, ces longues et difficiles opérations ont été menées à bien sans causer un seul court circuit et sans provoquer une seule réclamation.

Il les en félicite tous très cordialement.

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 9 Novembre 1929

Présidence de M. BUNET.

La séance est ouverte à 16 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

- Auroux** (André-Etienne), ingénieur à la Société L'Electro-Entreprise, 44, rue de la Chaussée-d'Antin, à Paris (9^e) (Agence de Tarbes), domicile à L'Electro-Entreprise, Chemin de la Gespe, à Tarbes (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Duclos et Delasalle.
- Ayral** (Jean, B. H. F.), directeur des Usines de la Compagnie des Lampes, 30, avenue de la Bourdonnais, à Paris (7^e). — Présenté par MM. Bunet et Saurel.
- Baloesco** (Etienne-Stéphan), 15, place des Etats-Unis, à Montrouge (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Barnard** (Henri-Osmond), ingénieur conseil, 59, boulevard Pasteur, à Paris (15^e). — Présenté par MM. Bunet et O'Keenan.
- Bernadac** (Marcel-Louis), ingénieur I. E. G., directeur de la Succursale de Bordeaux de la Compagnie Lorraine de Charbons pour l'Electricité, 12, rue d'Aguesseau, à Paris, domicile 9, cours du Chapeau Rouge, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. L. Rousseau et Raynaud.
- Bouchayer** (Hippolyte-Pierre), industriel, 57, rue Pierre-Charron, à Paris (8^e). — Présenté par MM. Dumont et Grosselin.
- Boutellier** (Charles-Jean), ingénieur à la Société d'Electricité et Gaz du Nord, 3, rue Victor-Hugo, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Bernaud et Etienne.
- Burhaneddin** (Osmand-Ferid), professeur à la Faculté des Sciences de Constantinople (Turquie). — Présenté par MM. Janet et Jouvion.
- Chaillous** (Théodore-Prosper), représentant (électricité et métallurgie), 174, boulevard Victor-Emmanuel, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Augier et Rousseau.
- Dagues de la Hellerie** (Jacques-Edmond-Raoul), planteur, 236, rue Mac-Mahon, à Saïgon (Cochinchine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Dauzère** (Camille-Jean), directeur de l'Institut et observatoire de Physique du Globe du Pic du Midi, à Bagnères de Bigorre (Hautes-Pyrénées). — Présenté par MM. Delasalle et Ledoux.
- Douce** (Pierre-Jean), ingénieur à la Compagnie pour la fabrication des compteurs et matériel d'Usines à Gaz, 6, rue Gravelle, à Levallois-Perret (Seine). — Présenté par MM. Ilievici et Dubusc.
- Drewnowski** (Casimir), professeur à l'Ecole Polytechnique de Varsovie, 75, rue Koszykowa, à Varsovie (Pologne). — Présenté par MM. Janet et Grosselin.
- Enright** (Eammon-Christophen), ingénieur electricity Supply board Ireland, 11, Lower St. Columbas Road Drumcondra, à Dublin (Ireland). — Présenté par MM. Veale et Grosselin.
- Faber** (Pierre-Etienne-Marcel), ingénieur conseil, Cabinet Faber, 11 bis, rue Blanche, à Paris (9^e). — Présenté par MM. Faber et Grosselin.
- Faure** (Henri-Lucien-Paul), 5, boulevard Jourdan, à Paris (14^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Forgues** (Edouard-Prosper), directeur de la Compagnie des Chemins de fer de Pau-Oloron-Mauléon et des Tramways Bayonne-Biarritz, 2, rue Montpensier, à Pau (Basses-Pyrénées). — Présenté par MM. Delasalle et Berthet.
- Gaillard** (Robert), ingénieur chef des travaux aux Galeries Lafayette de Lyon, 11 bis, rue Molière, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Canard et Rondet.
- Galopin** (William-Henri), directeur Bureau de Bordeaux de la Société de Travaux et d'Exploitation électriques, 8, rue Méret, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Le Roux.
- Gangnat** (Philippe), 24, avenue Friedland, à Paris (8^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Gheorghiu** (Ion S.), ingénieur, professeur à l'Ecole Polytechnique de Bucarest, Str. Dionisie, 94, à Bucarest (Roumanie). — Présenté par MM. Busila et Budeanu.
- Ingénieur en chef chargé de la Direction des Services télégraphiques de Paris**, 24, rue Bertrand, à Paris (7^e). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.

- Landousy** (Jacques-Charles), ingénieur à la Société générale d'Entreprises au Maroc, 25, rue de Courcelles, domicile, 293, boulevard Raspail, à Paris (14^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Laure** (Paul-Marie-Louis-Maurice), ingénieur E. S. E. au Service des ventes « Les Câbles de Lyon », 34, rue Sainte-Hélène, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Dumont et Delon.
- Le Vielleuze** (René-Albert-Léopold de), industriel, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Delasalle et Letertre.
- Lebot** (Paul-Lucien), chef électricien cimenterie de Lohinghen (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Fourcault et Grosselin.
- Lecorguillier** (Jean-Jacques-Alexandre), ingénieur à la Société Hewittic, 11, rue du Pont, à Suresnes (Seine), domicile, 35, rue Merlin-de-Thionville, à Suresnes (Seine). — Présenté par MM. Janet et Jouaust.
- Leroy** (Maurice-E.-V.), ingénieur à la Société générale de Constructions électriques et mécaniques « Alsthom », 57, boulevard de la Station, à Pierrefitte (Seine). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.
- Lévy** (Georges-Clément), ingénieur, directeur du Laboratoire Electro-Progrès, 42, rue Eugène-Carrière, à Paris, domicile, 61, rue Damrémont, à Paris (18^e). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.
- Liagre** (Charles), ingénieur-conseil, chef du Laboratoire de Recherches et d'Essais de la Société des Accumulateurs Fulmen, 46, rue de Nanterre, à Asnières (Seine). — Présenté par MM. Boucherot et Bunet.
- Magrin** (Jean), ingénieur I. E. T., licencié ès-Sciences, 50, rue Jeanne-d'Arc, à Paris (13^e). — Présenté par MM. Barillot et Lachaise.
- Maguin** (Georges-Pierre-Charles), ingénieur à la Compagnie des Compteurs, à Montrouge, 4, villa Hippolyte-Garnier, à Paris (14^e). — Présenté par MM. Ilivici et Chirol.
- Menster** (Camille-Mathias-Joseph), ingénieur à l'Union Minière du Haut Rochanga, à Bruxelles, 70, rue Stassart, à Bruxelles (Belgique). — Présenté par MM. Lavanchy et Grosselin.
- Moiroud** (Laurent-Pierre), ingénieur à la Société Alsthom, diplômé E. S. E., 38, rue de Torcy, à Paris (18^e). — Présenté par MM. Paradis et Thurwanger.
- Moïse** (Robert), ingénieur au Service des Ventes « Les Câbles de Lyon », 7, place des Célestins, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Dumont et Delon.
- Mondragon** (Hector-Eugène), Recherches scientifiques, 2, rue Frédéric-Passy, à Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. Bunet et Delton.
- Pion** (Marcel-Marie), ingénieur E. S. E., 14, rue Ernest-Renan, à Paris (15^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Polian** (Léon), ingénieur I. E. C., E. B. P., Ateliers de Constructions Electriques de Delle, chez M. Bonnard, 5, rue Octavio-Mey, à Lyon (5^e) (Rhône). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.
- Réglat** (Guy-Etienne-François-Daniel), ingénieur I. E. T. et E. S. E., 26, rue Serviez, à Pau (Basses-Pyrénées). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Rey** (Emile-Jean), ingénieur électricien aux Papeteries Navarre, Usine de Roanne (Loire), boulevard des Côtes, à Roanne (Loire). — Présenté par MM. Janet et Pannecière.
- Sirieys** (Raymond), ingénieur E. S. E., 155, avenue du Maine, à Paris (14^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Société d'Electricité et Gaz du Nord**, 33, rue de l'Industrie, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.
- Société Minière et Métallurgique de Pennaroya**, 12, place Vendôme, à Paris (1^{er}). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.
- Société de Transport d'Energie des Alpes**, 49, rue de la Bourse, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.
- Soyer** (Léon Achille-Louis), ingénieur A. E. M. et E. S. E., 15, rue de la Tuilerie, à Neuilly-Plaisance (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Spychala** (Jacob-Stanislas), ingénieur E. S. E., ingénieur radio E. S. E., 127, boulevard Brune, à Paris (14^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Teillard** (Robert-André), ingénieur à la Société « Alsthom », ingénieur E. C. P., 14, avenue de la République, à Nanterre (Seine). — Présenté par MM. Festarini et Thurwanger.
- Tricoire** (Jean), ingénieur à la Société des Etains du Cammon, à Boneng (Laos), domicile Boneng, Province de Thakhek, Laos (Indo-Chine).
- Union des Producteurs d'électricité des Pyrénées Occidentales**, 156, rue de l'Université, à Paris (7^e). — Présenté par MM. Bunet et Grosselin.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société Française des Electriciens.

M. le Président fait part, en ces termes, du décès de nos collègues MM. SEMENZA, ZETTER et TOURNAYRE :

M. GUIDO SEMENZA était bien connu de nous tous : ses débuts dans la carrière d'ingénieur remontent à la dernière décade du XIX^e siècle, époque où furent installés dans la région de Milan les premières usines électriques et les premiers réseaux de distribution. Sa compétence s'étendait on peut le dire à tous les domaines de l'électrotechnique ; familiarisé avec plusieurs langues européennes, d'une courtoisie et d'une affabilité extrêmes, il était devenu un des représentants les plus autorisés de l'industrie électrique italienne. Il fut président général de l'Associazione Elettrotecnica Italiana, et Président de la Commission Electrotechnique Internationale. Cette année même l'institution of Electrical Engineers lui avait décerné la Médaille Faraday. Nous prenions le plus vif plaisir à le rencontrer dans les réunions internationales tenues à Paris et nous avons tous gardé le souvenir de la remarquable conférence qu'il nous fit en 1923 sur les échanges d'énergie entre les réseaux. Il était des nôtres depuis cette époque et, comme nos amis italiens, nous sommes très douloureusement affectés par sa disparition prématurée.

M. ZETTER, qui était membre de notre Société depuis 42 ans et avait fait plusieurs fois partie de notre Comité, avait acquis une compétence indiscutée dans toutes les questions relatives à la construction d'appareillage électrique.

Il prit part notamment, par des travaux remarquables, à l'établissement des filetages internationaux pour lesquels il indiqua des procédés d'exécution régulière et économique. D'une très grande érudition, qui s'étendait aux problèmes de linguistique, il était resté un modeste et il fallut lui faire violence pour qu'il acceptât la présidence du Syndicat professionnel des Industries électriques. Il sera profondément regretté de tous ceux d'entre nous qui l'ont fréquenté.

M. TOURNAYRE, ingénieur à la Compagnie Continentale pour la fabrication des compteurs n'était entré dans notre Société qu'en décembre dernier. La mort ne lui a pas laissé le temps de nous apporter la fructueuse collaboration que nous étions en droit d'espérer de lui.

Vous vous associerez tous à l'hommage de profonde sympathie que j'adresse ici aux familles de nos très regrettés collègues.

M. le président annonce les promotions et nominations suivantes dans l'ordre de la Légion d'honneur :

Commandeur :

M. MARIAGE, Administrateur délégué de la S.T.C.R.P.

Officiers :

M. DELACHAUX, Président du Conseil d'administration des Aciéries de Gennevilliers.

SCHUHLER, Directeur de la fabrication des billets à la Banque de France.

M. SAUREL, Administrateur délégué de la Compagnie des lampes.

Chevaliers :

M. LANGLOIS-BERTHELOT, Ingénieur aux Ateliers de constructions électriques de Jeumont.

M. LECORBEILLER, Ingénieur des Télégraphes.

M. de MASSIAS de BONNE, Ingénieur en chef à la C.P.D.E.

M. de RAEMY, Administrateur-directeur des Ateliers de constructions électriques de Delle.

M. SARRAT, Directeur de la Société électricité et Gaz du Nord.

M. VIARD, Directeur général des Sociétés anonymes « Lignes télégraphiques et téléphoniques » nord-africaines.

M. le Président félicite vivement ceux de nos collègues, dont le mérite vient d'être officiellement consacré et il exprime le vœu que d'autres encore, dont la haute valeur technique est également si appréciée dans nos réunions ne soient pas trop longtemps oubliés comme il est arrivé à notre ancien Président Maurice LEBLANC. Il tient à signaler qu'un des nouveaux promus M. SCHUHLER a particulièrement bien mérité des électriciens français en obtenant, malgré de notables résistances, que l'un des grands hommes dont l'effigie est gravée sur les billets de banque de mille francs fût Ampère, l'autre étant Pasteur. HILLAIRET, en prêtant à M. SCHUHLER un portrait d'Ampère, s'associa à cet hommage.

Le Président rend compte que la réception à Paris et le voyage aux Pyrénées de l'Institution of Electrical Engineers, sous la présidence de M. EDGEUMBE, furent pleinement réussis, comme en témoignent les vifs remerciements qui nous sont parvenus de nos amis anglais. Il tient à

adresser l'expression de la reconnaissance de la Société aux Présidents, Administrateurs, Directeurs et Ingénieurs en Chef des Sociétés et Compagnies qui ont assuré le succès des réceptions et du voyage : Compagnie d'Orléans, Compagnie du Midi, Compagnie Parisienne de distribution d'électricité, Groupement des Secteurs de la Région Parisienne, Electricité de la Seine, Office des Inventions, Société française radioélectrique, Etablissements Belin, Groupe du S.-O. de la Société française des Electriciens, Institut électrotechnique de Toulouse, Usines de la Société des Phosphates Tunisiens à Soudom, Société des Forces Electriques de la Vallée de Gavarnie et de la Société Hydro-Electrique de la Cère, Usine de Lannemezan de la Société des produits azotés.

Au mois d'octobre, notre ancien président M. Eschwège a bien voulu convier les membres de notre groupe Sud-Ouest à inaugurer la très intéressante usine de Périgueux, où la Société Forclum développe chaque jour le procédé de fabrication des poteaux par centrifugeages. Cette visite, à laquelle M. Eschwège avait eu la délicate attention d'inviter le Président et le Délégué Général, a été suivie d'un somptueux déjeuner offert à nos collègues du S.-O. par la Société Forclum. Le Président adresse à M. Eschwège et à ses collaborateurs, en même temps que ses félicitations les plus sincères pour leurs réalisations, ses plus vifs remerciements, ainsi que ceux de tous nos collègues qui ont pu répondre à son invitation.

Le Président rend compte de la 6^e Semaine annuelle de discussions, qui s'est déroulée du 21 au 26 octobre dernier et qui a été particulièrement intéressante. La C. P. D. E. nous a gracieusement invités à visiter sa nouvelle usine d'Issy-les-Moulineaux et ses sous-stations de Vendôme et de la Nation. La Compagnie électromécanique nous a ouvert ses ateliers du Bourget où M. DARRIEUS nous a présenté, entre autres réalisations sensationnelles, des appareils destinés à utiliser l'énergie motrice du vent.

M. le docteur SAIDMAN nous a montré ses installations de radiations ultra-violettes qui rendent tant de services, notamment dans la lutte contre le rachitisme.

Aux Etablissements Gaiffe-Gallot-Pilon, M. PILON et ses collaborateurs nous ont convaincus qu'une protection pratiquement absolue contre les dangers des rayons X, pouvait être assurée à l'opérateur, au patient et aux personnes situées dans les pièces voisines.

M. le Président rappelle enfin que le prix Monteliore, pour 1929, a été partagé entre plusieurs lauréats, parmi lesquels nous avons eu la

satisfaction de voir figurer notre Président de 1930, M. PARODI et notre collègue M. PESTARINI.

L'ordre du jour appelle les communications techniques :

M. DEMONTVIGNIER expose la théorie de l'oscillographe cathodique à développement synchronisé⁽¹⁾ et M. TOULY indique les dispositions pratiques qui ont été prises pour en faire un appareil transportable⁽¹⁾. Ils exécutent à fréquences variables des expériences de synchronisation parfaitement réussies.

M. le Président remercie et donne la parole à M. DUVAL qui présente une communication sur les centrales hydroélectriques et lignes à 220 000 V aux Etats-Unis⁽¹⁾.

M. le Président remercie M. DUVAL et le félicite du succès de sa conférence qu'accompagnaient de nombreuses projections et qui a permis à ses auditeurs de se faire une juste idée des installations à haute tension réalisées aux Etats-Unis.

(1) Cette communication paraîtra *in extenso* dans un prochain Bulletin.

EXPÉRIENCES SUR LA PRODUCTION DU FROID PAR L'EFFET PELTIER ⁽¹⁾

par M. Horace TURRETTINI

Dans ses recherches sur la calorificité des courants, publiées en 1834, PELTIER ⁽²⁾ s'était demandé si le courant électrique produisait toujours un dégagement de chaleur et s'il ne pouvait pas, dans des conditions données, absorber de la chaleur.

Il découvrit alors qu'à la soudure de deux métaux, pour un certain sens du courant, il y a production de froid. On eut de la peine, au moment des expériences de PELTIER, à admettre cette production de froid par l'électricité. Beaucoup de physiciens pensaient que le courant pouvait bien produire un moindre échauffement pour un sens donné, mais non un véritable refroidissement au-dessous de la température ambiante.

Des expériences de LENZ ⁽³⁾ et de TYNDALL ⁽⁴⁾ entreprises dans le but spécial de vérifier cette production de froid par le courant électrique, confirmèrent pleinement celles de PELTIER.

Dès lors, l'importance théorique du phénomène réversible de Peltier, a provoqué de très nombreuses recherches, en vue d'établir les lois auxquelles il obéit, ses relations avec les phénomènes thermo-électriques, sa variation avec la température, etc...

La question plus spéciale du refroidissement au-dessous de la température ambiante par l'effet Peltier, qui avait excité tant d'intérêt lors de sa découverte, semble avoir été quelque peu négligée depuis. Le sujet a été traité au point de vue théorique, entr'autres, par M. E. ALTENKIRCH ⁽⁵⁾.

L'effet Peltier est le seul phénomène actuellement connu où le courant électrique produise du froid en quantité appréciable.

(1) Communication présentée par M. BETHENOD à la séance mensuelle de la Société du 2 mai 1929.

(2) PELTIER, *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LVI, p. 371 ; 1834.

(3) LENZ, *Poggendorf Annalen*, XLIV, p. 342 ; 1839.

(4) J. TYNDALL, *Philosophical Magazine*, Décembre 1852 et *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XXI, p. 317 ; 1852.

(5) E. ALTENKIRCH, *Zeitschrift für die gesamte kalt-Industrie*, t. XIX, 1912, p. 1.

On obtient encore une absorption de chaleur dans l'effet Thomson, dans certaines piles où l'énergie électrique surpasse l'énergie chimique Jahn ⁽⁶⁾, on en a prévu par l'électrisation [LIPPMANN ⁽⁷⁾, VASCHY ⁽⁸⁾, PELLAT et SACERDOTE ⁽⁹⁾]. M. A. PERRIER ⁽¹⁰⁾ a indiqué la possibilité de cycles magnétofrigorifiques.

Ces diverses absorptions de chaleur se trouvent masquées par des phénomènes irréversibles dégageant toujours de la chaleur ou n'ont pas encore pu être mises en évidence.

Il était donc intéressant de rechercher expérimentalement les conditions permettant d'atteindre l'abaissement maximum de température au-dessous de celle du milieu ambiant au moyen de l'effet PELTIER, en employant les couples les mieux appropriés, et de connaître le nombre de frigories utiles obtenues pour un abaissement de température donné. C'est le but que je me suis proposé dans le présent travail.

La plupart des traités d'électricité indiquent que le refroidissement au-dessous de la température extérieure produit par l'effet Peltier ne peut être observé qu'avec un courant très faible, qu'en outre il est éphémère, dès que le courant dépasse une intensité assez faible, la chaleur Joule finissant par l'emporter.

En fait de mesures thermométriques, on ne mentionne guère que les expériences de LENZ, dans lesquelles un thermomètre placé dans la soudure de deux métaux, traversée par un courant dans un sens donné, descendait de 4° C, mais remontait après quelques minutes, par suite de l'effet Joule.

J'ai pu, dans mes expériences, obtenir et maintenir indéfiniment des refroidissements allant jusqu'à 10 et 11° C au-dessous de la température ambiante et jusqu'à 17° à 18° C avec le dispositif décrit ci-après des couples échelonnés.

Les obstacles à la production du froid par l'effet Peltier sont : la chaleur produite par effet Joule et proportionnelle au carré de l'intensité du courant, alors que celle qui est absorbée par l'effet Peltier est proportionnelle à la première puissance de cette intensité; les communications de chaleur par conductibilité thermique intérieure et extérieure et les pertes par rayonnement.

(6) JAHN, *Wiedemann Annalen*, t. XXVIII, p. 21 (1886).

(7) LIPPMANN, *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, t. XXIV, p. 167 (1881).

(8) VASCHY, *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. I, p. 127 (1890).

(9) PELLAT et SACERDOTE, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. 127, p. 544 (1898).

(10) A. PERRIER, *Archives des Sciences Physiques et Naturelles*, Genève, p. 535 (1921).

Le problème consiste, d'une part, à atténuer ces pertes et à concentrer le froid dans la région des soudures froides, d'autre part à dissiper, dans le milieu ambiant, la chaleur Joule qui se dégage au delà de la région froide et la chaleur PELTIER produite aux soudures chaudes.

Dans la région froide, on cherche d'abord à réduire le plus possible la chaleur Joule et les pertes par conductibilité thermique intérieure. On obtient ce résultat en donnant, aux deux métaux du couple, des sections qui soient sensiblement dans le même rapport que leurs résistivités. Cette disposition permet, pour une section minima du couple, d'employer l'intensité de courant optima, c'est-à-dire celle qui correspond au maximum d'abaissement de température.

Dans cette région, le couple plonge d'une longueur déterminée dans un liquide contenu dans un récipient isolé thermiquement du milieu extérieur. (Dans mes expériences c'était le plus souvent un vase Dewar). Les courants naturels de convection du liquide soutirent aux surfaces métalliques du couple une partie du froid produit et l'empêchent de se propager par conductibilité thermique extérieure hors de la région froide. (Les pertes par conductibilité thermique intérieure ne peuvent naturellement pas être évitées. Elles sont atténuées par les dimensions respectives des sections des deux métaux.)

La région qui s'étend de la limite de la zone froide jusqu'aux soudures chaudes du couple, doit avoir une longueur suffisante pour qu'aucune communication appréciable par conductibilité thermique ne puisse se faire des soudures chaudes à la région froide. Elle peut présenter des formes et des dispositions propres à activer la dissipation des chaleurs Joule et Peltier dans le milieu ambiant, soit par l'augmentation des surfaces métalliques, soit parce que ces surfaces sont en contact avec un liquide qui leur enlève la chaleur produite.

Avec les couples les plus énergiques, j'ai pu, dans ces conditions obtenir et maintenir des abaissements de température allant jusqu'à 11°C au-dessous de la température ambiante (fig. 1, 2 et 2 bis).

Souvent de la glace s'est produite, même quand la température extérieure marquait 9 à 10°C au-dessus de 0 .

Pour avoir de plus grands refroidissements, il faut augmenter la longueur de la région froide du couple en le refroidissant au delà de la région froide primitive par des couples auxiliaires, qui peuvent eux-mêmes être refroidis de la même manière par d'autres couples auxiliaires. On forme ainsi des appareils à couples échelonnés, dont la section croît avec la hauteur.

La répartition des températures, lorsque le courant passe dans l'appareil, se fait par conductibilité thermique et aussi par les courants

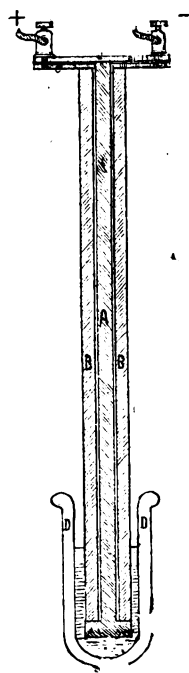


Fig. 1.

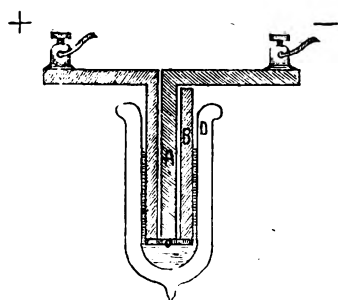


Fig. 2.

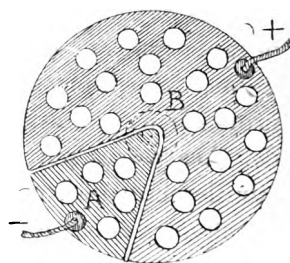


Fig. 2 bis.

naturels de convection des liquides en contact avec les surfaces des couples.

La proportion de ces couples auxiliaires à chaque niveau doit être suffisante pour absorber la chaleur Joule, parer aux pertes par rayonnement (réduites au minimum par l'enveloppe isolante entourant la région froide) et donner un nombre de frigories, permettant d'atteindre le régime permanent dans un temps donné.

Pour augmenter encore l'abaissement de température, les soudures de chaque étage peuvent plonger dans un liquide contenu dans un récipient isolant; on a ainsi des récipients concentriques, le liquide d'un récipient extérieur entourant la paroi d'un récipient intérieur (fig. 3).

Avec un appareil à deux étages, j'ai obtenu dans ces conditions un refroidissement dépassant 17°C au-dessous de la température ambiante. On arrivera sans doute à produire de plus grands abaissements de température.

La plupart des expériences de longue durée ont été faites avec des

appareils formés par un seul couple, en variant l'intensité du courant, la quantité de liquide refroidi, la longueur de la portion du couple plongeant dans le liquide.

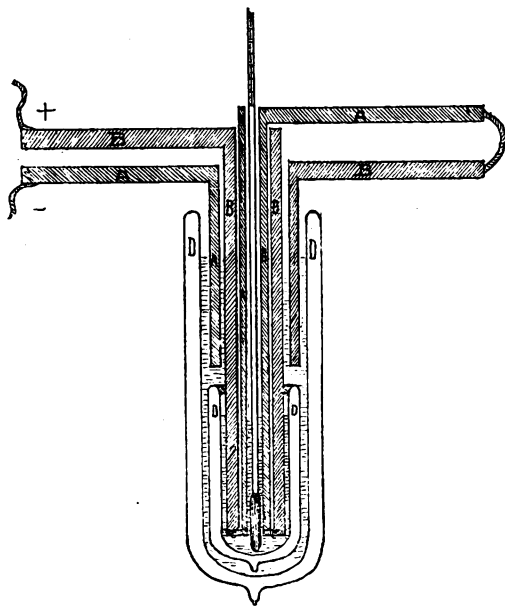


Fig 3.

L'expérience durait quelques heures et la température du liquide était observée de temps à autre avec un thermomètre marquant le $1/10^{\circ}$ de degré. A chaque observation, on prenait en même temps la température de la chambre dans un récipient contenant de l'eau.

Suivant la quantité de liquide employée et l'intensité du courant, le maximum de refroidissement était plus ou moins rapidement obtenu (en 1 ou 2 heures pour de petites quantités de liquide et jusqu'à 12 heures et plus pour des volumes de liquide plus importants).

On sait que l'absorption de chaleur par l'effet Peltier se produit à la soudure lorsque le courant passe du métal thermo-électriquement négatif au métal thermo-électriquement positif.

J'ai utilisé le plus souvent comme métal thermo-électriquement négatif l'alliage bismuth 15, antimoine 1 (quelquefois Bi ou Bi 20 Sb1) et comme métal thermo-électriquement positif, l'antimoine. Les sections étaient en général 1 cm^2 pour l'antimoine et 4 ou $4,6\text{ cm}^2$ pour l'alliage de Bismuth. Dans quelques expériences le métal thermo-électriquement négatif était : l'alliage Cu 54 Ni 46 ou Cu 60 Ni 40 (constantan) et le métal thermo-électriquement positif : les alliages anti-

moine-zinc ou antimoine-cadmium à équivalents égaux, indiqués par BECQUEREL, en y ajoutant $1/10^e$ ou $1/20^e$ de leurs poids de bismuth.

Avec un seul couple Bi 15 Sb 1 — Sb, l'intensité du courant a varié de 5 à 55 A pour une même section de 1 c^2 d'antimoine; la quantité de liquide refroidi, de 15 à 725 cc.

En employant plusieurs couples, j'ai pu opérer sur des volumes de liquide de plusieurs litres.

La longueur de couples immergée, variait de 1 à 10 c.

Diverses formes d'appareils ont été utilisées.

Dans les appareils 1, 2 et 3 (fig. 1), le métal thermo-électriquement négatif qui est l'alliage Bi 15 Sb 1 (B) forme un conducteur tubulaire entourant le métal thermo-électriquement positif, constitué par un conducteur cylindrique d'antimoine (A). A l'une de leurs extrémités les deux métaux sont soudés ensemble (soudure froide); à l'autre extrémité, chacun des métaux est soudé à un disque de cuivre (C). Le couple plonge dans un liquide contenu dans un vase Dewar (D). Les figures 2 et 2 *bis* sont relatives aux appareils 4, 5, 8 et 9. Après une portion tubulaire pour le métal le plus résistant, entourant une portion cylindrique de l'autre conducteur, les deux métaux s'épanouissent en secteurs horizontaux à large surface et percés de trous pour activer la convection.

Dans un autre appareil (6) non figuré, l'alliage de bismuth formait, pour augmenter les surfaces, quatre conducteurs cylindriques situés à la périphérie et reliés en parallèle. L'antimoine constituait un conducteur cylindrique central. Les métaux étaient réunis ensemble à la soudure froide par l'intermédiaire d'un disque de cuivre.

Dans une autre disposition, les métaux avaient la forme de plaques rectangulaires percées de trous (appareil 7).

Les appareils à deux étages 10 et 11 sont représentés schématiquement par la figure 3. Le métal thermo-électriquement négatif du 1^{er} étage (B) qui est l'alliage Bi 15 Sb 1 forme un conducteur tubulaire entourant un conducteur d'antimoine (A) tubulaire aussi et dans lequel on peut plonger un thermomètre à longue tige.

Le 2^e étage est constitué par un ou plusieurs couples auxiliaires entourant le couple du 1^{er} étage à partir d'une distance donnée de la soudure froide de ce couple. Ces couples auxiliaires, ainsi que le couple central, s'épanouissent du côté des soudures chaudes en secteurs horizontaux à large surface.

Les soudures froides de chaque étage plongent dans un liquide contenu dans un vase Dewar (D). Les deux récipients sont concentriques.

L'appareil 12 se compose de 3 étages avec la disposition de la figure 3.

La distance des soudures froides d'un étage à l'autre dans les appareils 10, 11 et 12 est de 9 centimètres.

Dans les tableaux qui suivent, pages 1275 à 1279, j'ai relevé quelques résultats de mes expériences, relatifs :

1° à l'abaissement de la température au-dessous de celle du milieu ambiant.

2° au nombre de frigories-heure apparues dans le liquide pour un abaissement de température donné.

Les chiffres notés sur ces tableaux donneront une idée de l'ordre de grandeur de l'effet frigorifique *utile* que peut fournir le phénomène de Peltier.

On verra, comme c'était à prévoir, que le nombre de frigories-heure utiles, diminue quand l'abaissement de température, auquel elles se rapportent, augmente.

Le refroidissement varie avec la nature du couple, l'intensité du courant, la quantité de liquide refroidi par un couple, la forme de l'appareil et la manière dont la chaleur se dissipe.

Pour observer rapidement l'effet Peltier et le refroidissement maximum, j'ai fait aussi de très nombreuses expériences avec des couples formés de métaux et d'alliages variés en employant et en perfectionnant la méthode de Lenz. Elle consiste à plonger un thermomètre dans un trou pratiqué dans la soudure des deux métaux du couple.

Dans l'expérience de LENZ, les deux métaux, qui étaient le bismuth et l'antimoine, avaient la même section, malgré leurs résistivités différentes. En outre, les chaleurs Joule et Peltier ne se dissipaient pas suffisamment dans le milieu ambiant.

Le thermomètre descendait de 4° C environ au-dessous de la température extérieure, mais remontait au bout de quelques minutes par suite de l'effet Joule.

Avec les dispositions indiquées dans les figures 4 et 5, on peut obtenir et maintenir avec les meilleurs couples des abaissements de température de 10° C au-dessous de celle du milieu ambiant. Les métaux forment des barres carrées de 10 à 14 cm de long. A partir de 20 à 30 mm de la soudure froide, les métaux plongent dans un liquide qui dissipe les chaleurs Joule et Peltier.

L'abaissement de température maximum est obtenu en quelques minutes. Pour le couple Bi 15 Sb 1 — Sb (sections Bi 15 Sb 1 4 cm², sec-

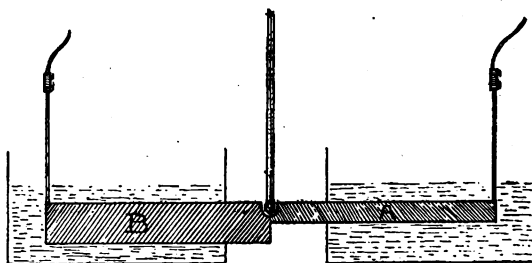


FIG. 4.

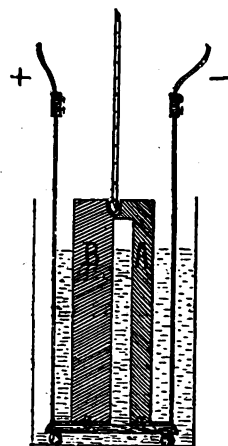


FIG. 5.

tion Sb : 1 c²) on obtient une baisse du thermomètre de 7° C pour un courant de 30 A environ et de 9 à 10° C avec 50 à 60 A.

La disposition de la figure 5 est commode non seulement pour observer le refroidissement maximum, mais pour la mesure relative de l'effet Peltier avec les couples les plus variés.

La méthode de production directe du froid par le courant électrique au moyen de l'effet Peltier se prêtera sans doute à des applications pratiques vu son extrême simplicité, lorsque des appareils de dimensions appropriées seront construits.

L'absence de tout mécanisme et de toute transformation physique ou chimique des substances réfrigérantes constituées ici par des corps métalliques permettra un fonctionnement indéfini et sans usure des appareils. En outre on pourra produire du froid à partir de la température la plus basse obtenue par une autre méthode en plaçant dans une enceinte, à cette température, des couples frigorigènes. Par la recherche de couples plus énergiques que ceux qui sont actuellement connus, par une atténuation plus grande des pertes par conductibilité et rayonnement et en perfectionnant la manière de disposer les couples on augmentera encore dans une large mesure le rendement frigorifique de l'effet Peltier.

Dimensions des Appareils.

N° de l'appareil	Nature du couple	Longueur du couple en centimètres	Section du couple en c²		Section totale en c²
			Métal thermo-électriquement négatif	Métal thermo-électriquement positif	
1	Bi — Sb.	34	4	1	5
2	Bi 15 Sb 1 — Sb.	34	4	1	5
3	Bi 15 Sb 1 — Sb.	47	4,6	1	5,6
4	Bi 15 Sb 1 — Sb.	10 plus une partie horizontale à large surface	4,6	1	5,6
5	Bi 15 Sb 1 — Sb.	5 plus une partie horizontale à large surface	4,6	1	5,6
6	Bi 15 Sb 1 — Sb.	50	4,6	1	5,6
7	Bi 15 Sb 1 — Sb.	20	4,6	1	5,6
8	Bi 15 Sb 1 — Sb 806 Cd 696 Bi 150. .	8 plus une partie horizontale à large surface	0,35	5,25	5,6
9	Cu 54 Ni 44 — Sb 806 Zn 406 Bi 61. .	id.	0,56	5,04	5,6

Appareils à 2 étages.

	Nature du couple	Etages			Etages			Etages			Etages		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
10	Bi 15 Sb 1 — Sb.	27 plus une partie horizontale à large surface	13		4,6 1 couple	3,68 1 couple		1 1 couple	0,80 1 couple		5,6	4,48	

N° de l'appareil	Nature du couple	Intensité du courant en ampères	Quantité de liquide en cc. dans un vase Dewar	Abaissement de la température du liquide en degrés centésimaux	La région chaude des couples est entourée d'eau ou non	1 couple
3	Bi 15 Sb 1 — Sb.	20	45	7°6 plus formation de glace	non	»
		26	48	10°6	oui	»
		31	85	8°7	oui	»
		31	45	9°5 plus formation de glace	oui	»
		31	45	10°8	oui	»
4	Bi 15 Sb 1 — Sb.	35	45	11°	oui	»
		20	48	9°2	non	»
		25	250	5°2	non	»
		26	39	7°2 plus formation de glace	non	»
		26	45	9°7	non	»
5	Bi 15 Sb 1 — Sb.	35	45	10°8	oui	»
		40,5	39	9°4	non	»
		55	39	9°3	non	»
6	Bi 15 Sb 1 — Sb.	10,5	725	5°4	non	»
		17	225	5°3	non	»
		29	225	7°3	oui	»
8	Bi 15 Sb 1 — Sb 806 Cd 696 Bi 150. .	4,5	65	5°2	non	»
		6	78	5°4	non	»
		8	42	5°7	non	»
9	Cu 54 Ni 46 — Sb 806 Zn 406 Bi 64. .	5,2	57	4°6	non	»
		8,7	57	6°	non	»
		10	45	5°6	non	»

N° de l'appareil	Nature du couple	Intensité du courant en ampères	Quantité de liquide en cc dans un vase Dewar	Abaissement de la température du liquide en degrés centésimaux	La région chaude des couples est entourée d'eau ou non
7	Bi 15 Sb 1 — Sb.	17 20	2000 2060	4°8 4°8	non non
10 couples 5 couples					

Appareils à 2 étages.					
N° de l'appareil	Nature du couple	Etages			La région chaude des couples est entourée d'eau ou non
		1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	
10	Bi 15 Sb 1 — Sb.	40,5 15 18,5 18,8 20 20	13,1 18,8 23,1 20 10 10	26 26 26 30 30 30	12°3 13°4 12°6 15°8 16°6 17°3
11	Bi 15 Sb 1 — Sb.			150 150 150 750 750 750	non non non oui oui oui

Appareil à 3 étages.					
12	Bi 15 Sb 1 — Sb.	18 15	9 7,5	9 7,5	17°8 17°4
			35 35	160 160	oui oui

N.-B. — Dans cet appareil à 3 étages l'abaissement de température ne dépasse guère celui qu'on obtient avec un appareil à 2 étages. Cela tient au fait que les proportions relatives de chaque étage n'ont pas été bien établies.

Petites frigories-heure obtenues avec le couple Bi 15 Sb 1 — Sb.Section Bi 15 Sb 1 : 4 ou 4,6 c² ; section Sb : 1 c².

N° de l'appareil	Intensité du courant en ampères	Quantité de liquide en cc dans un vase Dewar	Durée de l'expérience	Abaissement de la température du liquide au-dessous de celle du milieu ambiant en degrés centésimaux	Frigories-heure apparues dans le liquide	Frigories-heure rapportées à une intensité de 1 ampère
7	14	560	5 h. 5'	2°8	309	22,1
6	11	725	8 h. 17'	3°4	298	27,1
6	11	474	10 h. 17'	4°	184	16,7
2	15	82	1 h. 32'	4°2	225	15
6	29	225	3 h. 45'	5°2	312	10,8
2	13	40	2 h. 1'	5°5	109	8,4
6	29	225	6 h. 43'	6°6	221	7,6
3	31	85	3 h. 30'	7°4	180	5,8
5	40,5	39	1 h. 5'	7°6	274	6,8
3	31	85	5 h. 55'	8°6	123	4
2	26,5	15	1 h. 28'	8°9	91	3,4
2	31	15	1 h. 25'	9°3	98	3,2
5	40,5	39	2 h. 55'	9°4	126	3,1
4	35	15	1 h. 37'	10°4	96	2,7

Note annexe relative à la communication de M. Turrettini.

par J. BETHENOD.

La lecture de l'intéressante communication de M. H. Turrettini m'a suggéré quelques remarques, exposées ci-dessous. D'autre part, j'ai reçu à son propos une lettre et une brochure de notre ancien président, M. d'Arsonval, dont il m'a paru nécessaire de faire une mention spéciale.

1° Si on se reporte aux traités classiques de physique, on trouve généralement très peu de renseignements sur l'effet Peltier. Parmi ceux que je possède, le traité de O. D. Chwolson, tome IV, 2^{me} fascicule, pages 748 et suivantes, indique que la quantité de chaleur dégagée dans une portion de circuit contenant une soudure est de la forme

$$Q = \alpha I^2 - \beta I, \quad (1)$$

lorsque le sens du courant I est le même que celui qu'on obtiendrait thermo-électriquement si la soudure considérée avait la température la plus élevée.

Si l'on connaît les constantes α et β , le tracé de la courbe parabolique représentant l'égalité (1) permet de suivre aisément les variations de φ en fonction de I .

On constate d'après (1) que pour de petites valeurs de I , φ est négatif, c'est-à-dire qu'il se produit un *refroidissement* à la soudure, lequel est maximum pour $I = \frac{\beta}{2\alpha}$, et s'annule pour une intensité double, $I = \frac{\beta}{\alpha}$. Pour des intensités supérieures, φ devient positif et il y alors échauffement à la soudure, l'effet Joule représenté par le terme αI^2 devenant prépondérant.

En fait, d'après les très nombreux essais de M. TURRETTINI, il semblerait que le maximum de froid soit généralement atteint pour une intensité moindre que la moitié de celle qui correspondrait à la compensation de l'effet Peltier par l'effet Joule. En d'autres termes, le maximum réalisé expérimentalement se trouverait déplacé, par rapport au maximum théorique, vers l'origine de la courbe $\varphi = f(I)$.

2° La publication des résultats obtenus par M. H. TURRETTINI ne

paraît présenter un grand intérêt du fait qu'ils établissent l'ordre de grandeur du froid qu'il est possible de produire directement par l'électricité, en utilisant le phénomène Peltier. Cet ordre de grandeur paraît fort mal connu jusqu'ici, et beaucoup de physiciens semblent admettre que cet effet est difficile à mettre en évidence, en raison de l'effet Joule qui l'accompagne nécessairement. Dans le formulaire d'Hospitalier, il est dit notamment que « l'effet Joule se superpose à l'effet Peltier et le masque généralement ».

3° M. H. TURRETTINI fait remarquer que l'effet Peltier pourrait déjà être utilisé pour compléter une autre méthode de production du froid, puisqu'en partant de n'importe quelle température, il permet de descendre encore d'un certain nombre de degrés. Or, dans la notice qu'a bien voulu me communiquer M. d'ARSONVAL et qui est formée d'un Extrait des Annales de Physique et Chimie, Août 1902, consacré à l'air liquide, se trouve à la dernière page de très intéressantes indications à propos de l'utilisation de l'effet Peltier; je ne peux mieux faire que reproduire intégralement le texte de M. d'ARSONVAL :

« Je pourrai ajouter que grâce à la température exceptionnellement basse de l'air liquide, j'ai pu facilement montrer le phénomène de Peltier. Comme on le sait l'effet Peltier est la résultante de deux phénomènes opposés. Le courant qui traverse la soudure (dans le bon sens) tend à la refroidir proportionnellement au produit de la chute de potentiel E par ce courant I (phénomène Peltier), mais il tend aussi à l'échauffer proportionnellement à RI^2 (loi de Joule).

En refroidissant préalablement la soudure à la température de l'air liquide on diminue *considérablement* R , et c'est le phénomène Peltier alors qui devient prépondérant. J'ai proposé ce moyen, il y a trois ans, pour se rapprocher du zéro absolu, sans aucune prétention d'ailleurs à l'atteindre ». Par ces lignes, on peut voir que là encore, notre ancien président pourrait bien avoir ouvert une nouvelle voie vers des applications fort intéressantes de l'électricité. D'ailleurs, dans la lettre d'accompagnement, il me signale que dans l'état actuel de la physique, sa proposition de 1902 pourrait peut-être recevoir une application, en partant de l'hélium liquide, en vue d'arriver à des températures, inférieures aux plus basses atteintes actuellement. Il fait observer que, bien entendu, il faudrait vérifier que l'effet Peltier subsiste à ces températures, et il me semble qu'il y aurait là matière à des recherches pleines d'un grand intérêt.

A ce point de vue, les expériences et les idées de M. TURRETTINI, méritent toute l'attention des électriciens.

4° Ceux qui désirent étudier la question pourront se reporter avantageusement au brevet français de M. TURRETTINI déposé le 21 octobre 1925 sous le numéro 607 335; ils y trouveront la description de diverses dispositions proposées pour augmenter tant la capacité en frigories des appareils que la baisse de température réalisée. Pour ma part, j'estime que l'avenir devrait être aux appareils à étages, dont la figure 3 de la communication de M. TURRETTINI représente un modèle rudimentaire. Le perfectionnement de l'appareil à simple étage, tel que celui présenté en séance (fig. 1) ne semble pas en effet aisé; si on en augmente en effet la longueur, de façon à diminuer le transport de chaleur entre les soudures chaude et froide, on augmente forcément l'effet Joule dans les conducteurs A et B; si au contraire, on augmente la section de ceux-ci, on diminue bien l'effet Joule, mais l'échange de chaleur est facilité. Ces remarques, faites par notre collègue M. DARRIEUS, montrent la difficulté réelle du problème.

FORCES HYDRAULIQUES DE L'AFRIQUE ÉQUATORIALE FRANÇAISE ⁽¹⁾

par M. DARNAULT.

Chargé par le Ministère des Colonies, en 1926 d'une Mission en Afrique Equatoriale Française, je présente ce soir le but, les résultats et les conclusions de cette Mission, d'une durée de deux ans. — Le développement économique rapide de l'Afrique Equatoriale Française s'impose parce qu'elle est pourvue de nombreuses richesses naturelles qui ont déjà attiré l'attention de puissants groupes financiers. — Je ferai d'abord un court exposé historique de la situation acquise en 1914, puis des nouvelles conditions d'après guerre. Je donnerai un aperçu des richesses économiques et des difficultés d'exploitation causées par la pénurie de main-d'œuvre. — Il convient d'employer, là plus qu'ailleurs, d'abord parce qu'il s'agit d'un pays neuf, puis parce que l'énergie humaine est déjoillante, les puissants moyens modernes que procurent les forces hydrauliques abondantes et les distributions électriques. — Ce sera du temps et surtout beaucoup d'argent de gagnés. — D'où la Mission conçue par le Ministère des Colonies et plus particulièrement en vue de l'électrification du Chemin de Fer Congo Océan qui reliera le bassin navigable intérieur du Congo à l'Océan Atlantique par une ligne de 550 km. — Sans m'étendre sur les difficultés rencontrées je mentionnerai les principaux résultats obtenus par cette Mission. — Nous dégagerons les enseignements qu'il faut tirer de toute cette documentation pour notre politique économique en Afrique Equatoriale Française.

SITUATION DE L'AFRIQUE EQUATORIALE.

Avant la guerre.

Nos possessions dans l'Afrique Centrale ont été parcourues depuis peu d'années par de vaillantes Missions automobiles.

Je voudrais en quelques mots, attirer l'attention sur les possibilités de développement économique de ces pays trop longtemps négligés.

Congo Oubangui ! On ne peut entendre ces mots sans songer aux explorateurs, fonctionnaires et commerçants qui, depuis 50 ans ont patiemment conquis et organisé ces territoires.

(1) Communication présentée en séance mensuelle de la Société Française des Electriciens, le 5 Juin 1929.

DE BRAZZA, CRAMPELL, MARCHAND, MANGIN, LARGEAU, et bien d'autres, noms glorieux de ceux qui sous un climat meurtrier, après des combats acharnés contre des populations indépendantes se sont obstinés à nous conserver une immense colonie.

Si dans le domaine économique peu de chose y a été fait jusqu'ici, la France avait une excuse. Notre domaine colonial si grand ne pouvait être développé simultanément et le Borkou, ainsi que le Tibesti ne furent pacifiés qu'en 1914, peu avant la guerre.

Ainsi il y a 15 ans, s'achevait la conquête de ce territoire de 2 250 000 km², presque 5 fois la superficie de la France.

Il n'y avait à ce moment que quelques postes militaires et administratifs, répartis dans la brousse.

Des commerçants et Sociétés concessionnaires commençaient par l'établissement de factoreries le commerce avec les indigènes, non sans danger parfois.

Quelques bateaux à roues assuraient le transport et le ravitaillement des colonnes allant vers le Tchad, et une Compagnie minière avait entrepris l'exploitation de minerai de cuivre de la région de Mindouli.

Au Gabon, où nous étions installés depuis plus longtemps, la forêt était déjà exploitée.

Au moment où ces colonies allaient pouvoir être mises en valeur d'une façon rationnelle par l'exécution de grands travaux, la guerre mondiale bouleversait tous les programmes établis.

Pour la conquête du Cameroun, particulièrement pénible, trois colonnes reçurent la mission d'occuper les territoires allemands en liaison avec les colonnes anglaises et belges. Le Cameroun tout entier fut conquis, et en janvier 1916, Yacundé tombait au pouvoir des alliés.

Après la guerre.

Après la guerre, sous l'active impulsion des derniers Gouverneurs généraux, cette Colonie attira l'attention de la Métropole et le Chemin de fer Congo Océan fut commencé.

On a souvent fait un parallèle entre le développement du Congo Belge et celui de l'Afrique Equatoriale Française. Si l'on doit admirer l'effort de nos alliés, il faut se souvenir de l'œuvre gigantesque que nous avons réalisée dans tant d'autres de nos possessions et comprendre que ce pays, dernier venu parmi nos colonies, difficile à con-

quérir, amputé parfois par les traités, mal connu, sans capitaux, ne pouvait se développer.

Si l'on regarde une carte d'Afrique, on voit qu'il n'y a aucune raison pour que la région française du Congo ne possède pas de gisements semblables à ceux du Congo Belge, quoique peut-être moins importants, et cela en raison de la constitution géologique de la cuvette du Congo.

Or, diamant, terres rares et pierres précieuses de l'Oubangui; cuivre, argent, plomb, zinc du Moyen Congo, dans la région traversée par le chemin de fer Brazzaville Océan, pour ne parler que de ce qui est connu actuellement, seront exploités dans peu d'années par des groupes puissants.

D'autre part, toutes les zones de végétation sont représentées, depuis la grande forêt qui couvre toute la partie centrale, bassins de l'Ogoué et du Congo, jusqu'à la brousse clairsemée du Tchad et de l'Oubangui. Elles permettront d'entreprendre des cultures variées (café, cacao, palmier à huile, caoutchouc, sisal et coton).

Difficultés particulières.

La mise en œuvre de ces richesses a été retardée par le manque de grandes voies d'accès, mais le chemin de fer en construction, des routes nombreuses complètent bientôt le réseau navigable intérieur.

La population, laissée sans soins sous un climat très dur depuis des siècles, toujours sous-alimentée, a été décimée par la maladie et est réduite à 3 200 000 habitants.

Ce manque de main-d'œuvre ne pourra toutefois arrêter le développement rapide du pays, comme on pourrait le craindre.

A l'heure actuelle, des médecins se dépensant sans compter, prodiguent leurs soins dans tous les villages, mais l'éducation sanitaire entreprise est une œuvre de longue haleine et l'on a le devoir d'essayer de réduire le plus possible les besoins en main-d'œuvre. En particulier la technique actuelle permettant l'emploi d'engins agricoles ou industriels doit intervenir.

De plus, les indigènes intelligents peuvent être formés aux travaux les plus divers, et déjà Brazzaville compte un nombre respectable d'employés et d'ouvriers qui rendent de grands services.

Qu'il me soit permis de dire quelques mots sur les difficultés rencon-

trées à l'heure actuelle par les divers groupements, pour décider les techniciens français à passer quelques années dans ces pays dont il est très difficile de se faire une idée exacte, ceux qui en sont revenus ayant tendance tout naturellement à en exagérer les périls.

La vie de brousse est large, dégagée de bien des soucis qui assaillent dans les régions civilisées.

Ce qui manque encore, c'est la notion du confort. Tous ceux qui emploient des Européens leur demandent de fournir un très gros effort avec des conditions de vie différant totalement de celles auxquelles ils étaient habitués, sans se préoccuper de leur procurer des habitations confortables et saines.

Une caractéristique du caractère français est de savoir, avec de petits moyens, réaliser de grandes choses ; mais ce sacrifice, en général, se paye par l'altération de la santé et la diminution des forces.

MISSION.

En 1926 la Mission d'Etudes, composée, sous notre Direction de MM. BARBEROT, SCHUMER, ODET, VACHEROT, DUCHEMIN, GONTARD, était constituée par M. LÉON PERRIER, Ministre des Colonies et le Gouverneur Général ANTONETTI.

La documentation dont nous disposions était peu importante, divers renseignements furent recueillis dans des rapports de STANLEY, DE BRAZZA, MM. LAVIT, ROUSSILHE, LUDES, THYS.

L'Administrateur en Chef BRUEL avait, en 1918, établi une carte et une liste des quelques chutes connues.

GÉNÉRALITÉS SUR L'OROGRAPHIE ET RÉGIME FLUVIAL.

Entre les bassins des fleuves côtiers, du Congo et du Chari, la transition est presque insensible ; des massifs montagneux peu importants et de faible altitude les séparent.

On peut distinguer la zone côtière à l'Ouest, la cuvette du Congo au Sud et à l'Est, au Nord la dépression Tchadienne.

Par son étendue et sa position de part et d'autre de l'Equateur, l'Afrique Equatoriale Française est soumise à un régime de pluies très diverses, ce qui donne la même différence pour les eaux courantes.

Du Nord au Sud, on trouve des Ouadis Sahariens presque toujours à

sec, des cours d'eaux temporaires, puis des rivières permanentes charriant assez d'eau pour résister à l'évaporation.

Enfin, dans la zone équatoriale, des fleuves énormes, subissent des crues périodiques très fortes.

On peut distinguer, dans le bassin du Tchad : le Chari et ses affluents ;

le bassin du Congo avec l'Oubangui et le Sangha ;

les bassins côtiers du Como, de l'Ogoué, de la Nyanga, du Kouilou Niari et de la Loémé.

Ce n'est pas en deux ans que nous pouvions avoir la prétention de dresser l'inventaire qui nous était demandé, travail très long étant donné les difficultés d'accès dans tout ces territoires.

Nous avons limité nos études aux régions susceptibles d'avoir une vie économique intense dans un petit nombre d'années.

Petit à petit, les études complémentaires venant prendre leur place dans le cadre général tracé, il sera possible, connaissant le régime des principaux cours d'eaux étudiés, de faciliter dans une grande mesure les aménagements hydro-électriques, ainsi que l'irrigation et la navigation.

Les documents recueillis concernent, pour la région du chemin de fer, les affluents du Congo, les fleuves Kouilou Niari et Loémé ;

L'Oubangui et ses affluents ;

Le Bahr Sara et le Gribingui, affluents du Chari.

Organisation de la Mission et reconnaissance préliminaires.

Dans l'impossibilité d'avoir des renseignements exacts sur les diverses régions à parcourir, il fut décidé d'effectuer des reconnaissances générales pour permettre par la suite d'envoyer des groupes d'Études aux seules chutes reconnues intéressantes.

Ces reconnaissances générales, effectuées au moment de l'étiage 1297, devaient permettre de poser partout des échelles provisoires.

Résultats en fin d'année 1927. — Installation.

La Mission avait établi :

Un bureau avec chambres pour les membres de passage à Brazzaville.

Une base complète située à Mibouende à 50 km de Brazzaville pour

permettre des reconnaissances faciles, soit dans le bassin du Kouilou, soit dans le bassin du Congo et comportant :

quatre grandes habitations pour Européens,
bureau de dessin, atelier, magasins pour le matériel,
village de travailleurs avec plantations et jardins,

La superficie du poste était d'environ deux hectares.

Au cours de la saison des pluies de 1928, des plantations de bananiers et de palmiers devaient être effectuées.

Etudes.

Les reconnaissances générales des affluents du Congo et du bassin du Kouilou étaient terminées.

Un groupe d'Etudes avait exécuté le levé des chutes ci-après, procédé à des jaugeages et posé des échelles limnimétriques.

Le Congo ayant, dans la région des rapides, creusé une vallée très encaissée, tous ses affluents présentent des chutes verticales au confluent.

Les débits du Congo varient entre 30 000 et 80 000 m³, ce qui correspond, au moment de l'étiage, à 60 fois le débit du Rhône à Arles.

Année 1928.

Deux groupes d'Etudes étaient envoyés, l'un dans la Loemé, pour étudier les chutes voisines du chemin de fer ;

l'autre, dans la région de la Bouenza.

Simultanément, j'entreprenais une reconnaissance générale et rapide des bassins de l'Oubangui et du Chari, de façon à avoir les caractéristiques d'étiage de ces cours d'eaux.

En septembre 1928, après une nouvelle tournée complémentaire dans le bas Congo, les 2 groupes commençaient la mise au point de leurs travaux.

En juin, nous étions redescendus de l'Oubangui après avoir effectué des jaugeages au moulinet et au flotteur sur les principaux affluents rive droite, de l'Oubangui et ceux du Chari, posé des échelles d'étiage, étudié les chutes principales.

Jusqu'à la fin de l'année, de nombreuses tournées secondaires ayant pour but la vérification des premiers travaux et de nouveaux jaugeages furent entrepris.

Les caractéristiques des chutes principales étudiées sont résumées dans les tableaux ci-après :

RIVIÈRES	Bassin versant total Km ²	Bassin versant à la station de jauge en Km ²	Débit d'étiage en m ³	Hauteur de chute	Débit en L. par Km ² étiage	Puissance minima	Débit en L. par Km ² 6 mois	Puissance Moyenne
Bassin du Congo								
Djiri	672	658	25	10	37	2 500	45	3 000
Djoué	4 805	4 805	120	10	27	12 000	37	18 000
Foulakary	2 800	2 790	11	113	4	12 000	16	40 104
Louvoubi	364	356	1	143	2,9	1 400	10	5 100
Loenga	492	472	2,5	112	2,5	2 800	10	5 300
Loumo-Ngoma Tchimba	»	180	0,75	120	4,1	800	10	2 160
Loufou	320	315	0,80	123	2,5	1 000	10	3 900
Bassin du Kouilou Niari.								
Bouenza	6 010	5 500	60	59	8,5	30 000	17	46 750
Louesse	13 600	12 000	143	57	9	77 000	17	116 280
Loubama	478	400	4,9	86	12	4 300	17	5 848
Itchibou	1 134	880	5,6	161	6,3	10 000	15	21 252
Bassin de la Loeme.								
Loeme	3.795	935	6	50	6,4	3 000	12,3	5 860
Bassin de l'Oubangui Chari.								
Kotto	73 180	60 000	185	15	3	27 700	8	72 000
M'Bali	14 470	4 340	30	110	8	33 000	14	64 000
M'Bi	8 230	1 850	12	56	6,7	6 700	13	13 465
N'Guitto	160	110	0,07	230	0,7	150	5	1 265
Nana	2 600	2 530	1,650	22	0,65	330	3	1 700

RÉSULTATS D'ENSEMBLE.

Avant mon départ pour l'Europe, au début de décembre 1928, la mise au point des travaux était très avancée.

Divers projets de décrets relatifs à la production et la distribution de l'énergie avaient été élaborés en tenant compte des législations existant en France et dans certaines de nos Colonies.

Le principe de la création d'un service d'études des forces hydrauliques était approuvé par M. le Gouverneur Général ANTONETTI.

De nouvelles tournées au Moyen Congo étaient décidées, ainsi qu'une reconnaissance des régions voisines de Libreville et de port Gentil au Gabon. Deux des membres de la Mission, sous la direction de l'Ingénieur BARBEROT, s'y trouvent actuellement.

Malgré les difficultés de toutes sortes, en près de deux ans, 13 000 km ont été parcourus à pied ou en tipoye (sorte de brancard

porté par quatre indigènes), 17 000 km en pirogue, baleinière ou automobile ;

des pluviomètres et 33 échelles limnimétriques installés à poste fixe
70 jaugeages exécutés tant au moulinet qu'au flotteur ;

110 plans de chutes et de leurs accès relevés.

Des échantillons de roche à l'emplacement des divers ouvrages possibles, ont été remis au service des Mines à Brazzaville et à Bangui, ainsi que des prélèvements d'eau recueillie à des sources thermales de l'Oubangui.

Des postes émetteurs, récepteurs de télégraphie sans fil, ont fait l'objet de nombreux essais et sont maintenant installés à poste fixe ;

Tels sont les résultats généraux obtenus.

M. DARNAULT fait alors le récit, illustré de nombreuses projections, de son voyage d'études au Congo belge, en Rhodésie, en Afrique Orientale portugaise au Tanganyka, Zanzibar et en Egypte.

Il décrit les principales installations de ces divers pays, qui sont en plein développement.

CONCLUSION.

Nous avons progressé très lentement en Afrique Equatoriale Française et bien des excuses peuvent être invoquées.

Mais l'histoire a montré que les Français savent souvent rattraper le temps perdu.

Laissez-moi croire que l'électricité jouera le plus grand rôle dans la période féconde qui va s'ouvrir.

Observations de M. Gratzmuller.

En 1926, de retour en France d'un voyage d'étude des usines hydro-électriques européennes, M. DARNAULT a bien voulu me rapporter un document et un souvenir aimable de M. DONATI le distingué et sympathique ingénieur des chemins de fer Italiens, notre hôte en 1926. C'est ainsi que j'ai fait la connaissance de M. DARNAULT.

J'ai été tout de suite frappé par la clarté d'esprit de M. DARNAULT et par le courage souriant et modeste avec lequel il m'exposait un gros plan de travail d'une durée de deux années en A. E. F. ; dans un pays réputé plutôt inhospitalier en l'état actuel.

Son départ m'a un peu ému.

M. DARNAULT a eu la gentillesse de me tenir au courant par correspondance en 1927 et 1928 pendant son séjour en A. E. F., puis il est venu me voir aussitôt son retour.

A l'idée émise de venir vous entretenir ce soir à la S. F. E. de sa mission, M. DARNAULT m'a d'abord répondu qu'il préférerait retourner en mission. Vos applaudissements prouvent que j'ai bien fait d'insister.

Vous avez entendu quelques indications essentielles. Mais, vous ne soupçonnez pas ce que la physionomie juvénile de M. DARNAULT cache de talents d'organisation, de ténacité et de sérénité dans l'effort. Une moisson considérable de documents, de notes précises admirablement classés en est le résultat avec surtout, une grande connaissance des indigènes et de la manière d'agir efficacement dans les régions les plus sauvages de l'A. E. F. Mais, nous reverrons M. DARNAULT dans quelques années, lorsqu'il viendra nous entretenir des distributions électriques réalisées, enrichissant définitivement nos colonies en leur procurant confort et hygiène. Ce sera l'œuvre des techniciens qui trouveront aussi des solutions pour le rafraîchissement des habitations, programme cher au regretté Maurice LEBLANC, à Georges CLAUDE et à BOUCHEROT.

Vous avez eu comme moi, à entendre M. DARNAULT, l'impression que ni lui, ni ses fidèles collaborateurs n'ont pas rencontré de difficultés ou de dangers sérieux.

En vérité, c'est avec le sourire qu'ils les ont vaincus.

SUR UN PROCÉDÉ PERMETTANT LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES TOLES AUX FAIBLES INDUCTIONS EN COURANT ALTERNATIF

Par MM. R. JOUAUST et P. WAGUET.

Le problème posé au Laboratoire Central d'Electricité était le suivant : Trouver un procédé permettant de déterminer en courant alternatif de fréquence industrielle et aux faibles inductions (inférieures à 2 000) les propriétés magnétiques des tôles destinées à la construction des transformateurs de mesure.

Telle est l'origine de l'étude qui va suivre.

1° *Epreuves*. — Le type d'éprouvettes utilisé dans cette étude était celui d'un anneau toroïdal à section rectangulaire, constitué par un certain nombre de rondelles de tôles superposées et ayant les dimensions suivantes :

Diamètre extérieur...	11 cm
— intérieur.....	7 cm
Masse	1 500 gr

Bien entendu toutes les rondelles de tôles étaient isolées au papier.

Sur cette éprouvette étaient disposés un enroulement primaire en gros fil de 150 spires, et 4 enroulements secondaires en fil fin de 400 spires chacun.

2° *Mesure de l'induction en fonction du champ*. — Le champ magnétisant est donné par la formule :

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi n I_{\max}}{10\pi d}$$

n nombre total de spires de l'enroulement magnétisant, d diamètre moyen de l'éprouvette, $I_{\max}$ valeur maximum du courant magnétisant exprimé en ampères.

Les appareils de mesure utilisés en courant alternatif ne donnent que la valeur efficace I_{eff} du courant magnétisant.

Si ce courant était rigoureusement sinusoïdal, on aurait : $I_{max} = \sqrt{2}I_{eff}$ mais généralement le courant magnétisant est assez déformé et la relation ci-dessus pourrait conduire à des résultats assez erronés.

Ainsi dans les expériences faites on a trouvé suivant les cas des rapports $\frac{I_{max}}{I_{eff}}$ variant de 1,41 à 1,47.

L'application de la formule $I_{max} = I_{eff}\sqrt{2}$ aurait donc pu entraîner des erreurs de l'ordre de 4 pour cent dans l'évaluation du champ magnétisant.

Pour déterminer la valeur maximum du courant magnétisant, nous avons employé le procédé du voltmètre de crête, dont nous rappelons sommairement le principe.

Si une différence de potentiel alternative est appliquée d'une part au filament d'un diode et d'autre part à une armature d'un condensateur dont l'autre armature est réunie à l'anode du diode, ce condensateur se charge à la tension maximum de la différence de potentiel alterna-

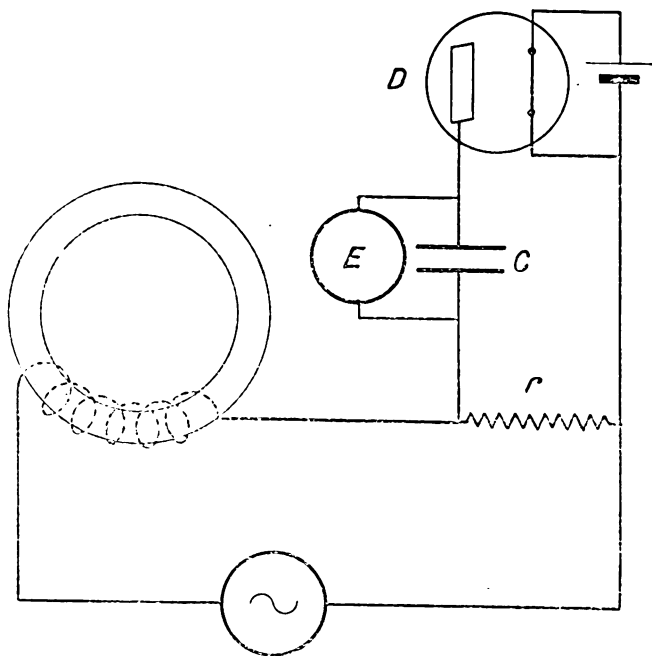


Fig. 1.

tive et c'est cette valeur maximum qu'indique un électromètre placé en dérivation aux bornes du condensateur.

Pour déterminer la valeur maximum du courant circulant dans l'enroulement magnétisant, une résistance pure r de 200 ohms était placée en série avec cet enroulement magnétisant et le voltmètre de crête était disposé aux bornes de cette résistance (fig. 1).

Le diode D est construit par la Compagnie des Lampes sous la désignation Métal K2.

La capacité C en série avec l'anode était un condensateur au papier, de 2 microfarads, isolé pour 1 000 volts et l'électromètre E , un électromètre Ayrton Mather donnant sur une échelle placée à 1 mètre une déviation de 50 cm pour 30 volts.

La détermination de l'induction correspondant à un champ magnétisant donné peut se déduire de la valeur moyenne de la différence de potentiel aux bornes de l'enroulement secondaire par la formule :

$$\mathcal{B} = \frac{10^8 E_{\text{moy}}}{4/NS}$$

S section de l'éprouvette en centimètres carrés, f fréquence du courant en périodes par seconde, N nombre de spires de l'enroulement secondaire, E_{moy} étant exprimé en volts.

Le diode permet l'évaluation de la tension moyenne avec une préci-

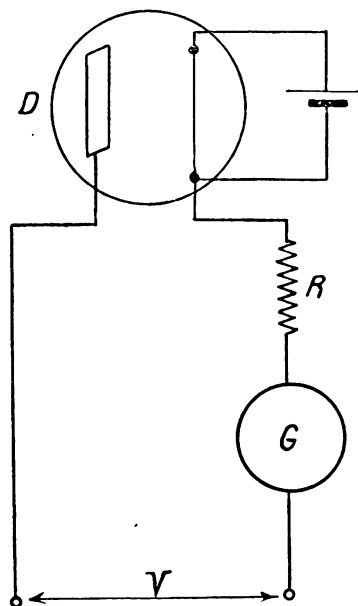


Fig. 2.

sion suffisante pour des mesures comme celles qui sont envisagées ici.

Supposons une différence de potentiel alternative V appliquée d'une

part au filament, d'autre part à l'anode du diode D (fig. 2) par l'intermédiaire d'une résistance élevée R. Soit I l'indication du galvanomètre G.

Appliquons maintenant une différence de potentiel continue E, telle que l'intensité I' indiquée par le galvanomètre ait une valeur voisine de celle de I.

On peut démontrer que l'on a très sensiblement :

$$\frac{V_{\text{moy}}}{2E} = \frac{I}{I'}$$

L'établissement de la formule ci-dessus contient un certain nombre d'hypothèses en particulier la constance de la conductance du diode K. Pour rendre les variations de cette grandeur sans importance on a intérêt à donner à R une valeur élevée.

Dans les expériences réalisées, la résistance R était de l'ordre de 1 mégohm, et le galvanomètre G un microampèremètre Siemens donnant une division par microampère. Le diode était celui mentionné plus haut. Le nombre de spires de l'enroulement secondaire utilisé a varié entre 1 600 et 400.

Dans un grand nombre d'expériences faites dans diverses conditions de fonctionnement sur un alternateur de facteur de forme bien connue, on a constaté que pour les tensions supérieures à 15 volts, le dispositif ci-dessus donnait une précision du même ordre que celle des autres procédés employés pour la détermination du facteur de forme. Pour les très faibles inductions, correspondant à des points pour lesquels le nombre de spires employé ne donnait que des tensions inférieures à 15 volts, on a utilisé la remarque faite au cours des essais que lorsque l'induction était peu élevée, la valeur du facteur de forme était sensiblement celle relevée à vide sur la source de courant alternatif employée.

3° *Mesures des pertes.* — Si on désigne par e la valeur instantanée de la force électromotrice induite dans l'enroulement secondaire, par i la valeur instantanée de l'intensité du courant circulant dans l'enroulement primaire, la puissance dépensée par hystérésis et courants induits dans l'éprouvette est :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt.$$

Pour la mesure on a opéré de la manière suivante :

L'une des extrémités de l'enroulement secondaire est réunie à l'élec-

tromètre E (fig. 3) l'autre à l'une des extrémités A d'une résistance r non inductive en série avec l'enroulement primaire, l'autre extrémité B étant reliée à l'électromètre. En désignant par n le nombre des spires primaires, par N le nombre des spires secondaires, par U les indica-

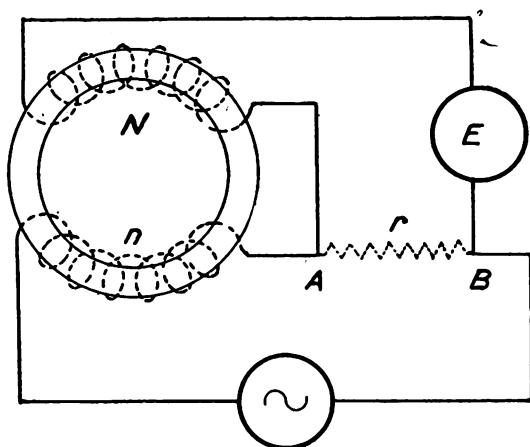


Fig 3.

tions de l'électromètre, par U' les indications de cet appareil quand on inverse les connexions allant aux points A et B, on a :

$$P = \frac{1}{4r} \frac{n}{N} (U^2 - U'^2).$$

Cette méthode de mesure des puissances est du reste classique.

Les mesures ont été effectuées avec l'électromètre Ayrton Mather mentionné plus haut, la résistance r avait une valeur de 200 ohms, le nombre de spires secondaires a varié de 400 à 1 600.

ACCOUPLEMENT MAGNÉTIQUE SANS FROTTEMENT⁽¹⁾

Par M. PESTARINI.

L'accouplement magnétique sans frottement a pour but de transmettre un torque d'un arbre tournant à un autre avec les propriétés particulières suivantes :

- a) la transmission du couple ne se fait pas par frottement ;
- b) la transmission se fait d'une manière élastique ;
- c) le calage relatif entre les deux rotors peut être modifié à volonté en marche par le simple réglage d'un courant d'excitation ;
- d) il permet de mesurer le torque transmis.

Il consiste essentiellement en un circuit magnétique aimanté par une bobine excitatrice et composé de plusieurs parties mobiles l'une par rapport à l'autre, une première de ces parties est rigidement calée sur le premier arbre, et une deuxième partie du circuit magnétique est calée rigidement sur le deuxième arbre. Les différentes parties du circuit magnétique sont formées de manière que la perméance varie avec le calage relatif des deux arbres ; c'est la tendance du système magnétique à augmenter sa perméance qui crée le couple qui maintient les deux arbres reliés entre eux. Pour un certain calage relatif, la perméance du circuit magnétique est maxima, et pour un certain autre calage relatif, la perméance est minima, je dirai que ces parties sont en concordance de phase au premier cas et phase opposée au deuxième cas, et je désignerai la première partie et la deuxième partie du circuit magnétique immédiatement calée sur les arbres, par les appellations respectives d'élément primaire, et élément secondaire.

Les figures 1 et 2 donnent deux sections d'un exemple de cet accouplement. A et B sont les arbres à accoupler, C et D sont l'élément primaire et secondaire respectivement qui comportent des dents polaires F, F', F₁, et G, G', E enfin est la bobine inductrice. Quand les dents

(1) Communication présentée à la séance de la 1^{re} Section du 10 mai 1929.

polaires sont bien en face l'une de l'autre, le primaire est en concordance de phase avec le secondaire, quand les dents polaires de l'un sont

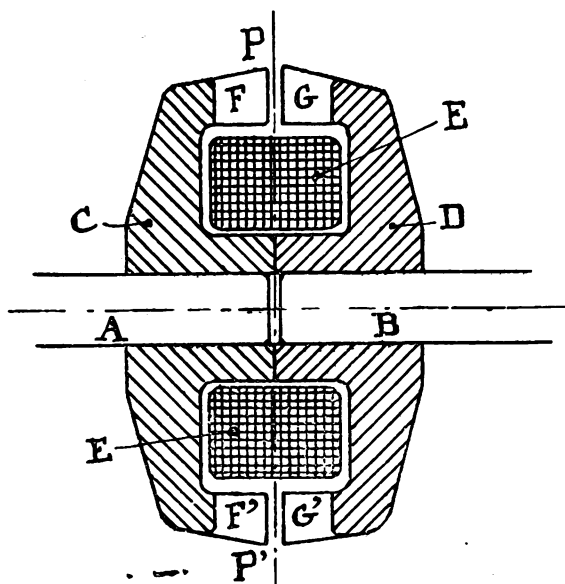


Fig. 1.

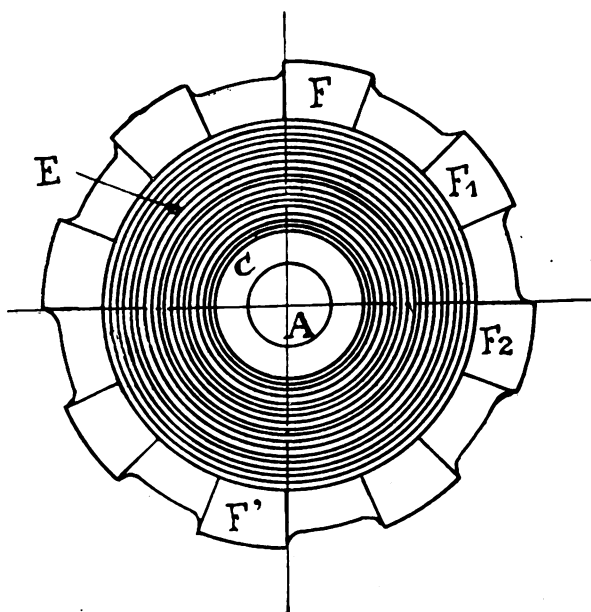


Fig. 2.

en face du milieu des creux de l'autre, le primaire et le secondaire sont phase opposée.

Soit I le courant d'excitation, et admettons que le déplacement relatif des deux parties soit lent, alors I est pratiquement constant, et le couple C pourra être exprimé par la formule de Picou :

$$C = K_1 \frac{d\mathcal{Q}}{d\omega} I^2 \quad (1)$$

où $\mathcal{Q}$ est la perméance du circuit magnétique pour le calage relatif ω à partir d'une origine arbitraire, et où K_1 est une constante, si l'on admet, comme nous le ferons, qu'on est loin de la saturation du fer.

Si l'on veut que C soit une fonction voulue, $f(\omega)$ du calage, on s'arrangera pour rendre la perméance $\mathcal{Q}$ égale à :

$$\mathcal{Q} = \frac{1}{K_1 I^2} \int_{\omega_0}^{\omega} f(\omega) d\omega$$

On peut faire varier pour cela l'entrefer compris entre les deux épanouissements polaires en face l'un de l'autre, mais ici pour simplifier, nous supposons que cet entrefer est constant. Si alors S est la surface recouverte simultanément par les épanouissements polaires, primaires et secondaires, on pourra écrire :

$$\mathcal{Q} = K_2 S$$

où K_2 est une constante quand on néglige l'effet des franges magnétiques (l'entrefer très faible rend cela facilement acceptable) et quand on néglige la perméance du fer devant celle de l'air. Alors on pourra écrire :

$$C = K \frac{dS}{d\omega} I^2 \quad (2)$$

où K est une constante.

Supposons, pour la simplicité, que toutes les dents primaires et secondaires aient la même forme d'épanouissement polaire, et soit n le nombre de ces dents supposées équidistantes, il est clair que le couple C est une fonction alternative de l'angle du décalage relatif dont la période est $\Omega = \frac{2\pi}{n}$. Le couple est nul quand le primaire et le secondaire sont en concordance de phase, ou en phase opposée, et il est tantôt dextrorsum, tantôt sinistrorsum. Chaque période est composée de deux parties, l'une qui correspond à un régime stable, et l'autre à un régime instable suivant le signe de la dérivée seconde :

$$\frac{d^2 S}{d\omega^2}$$

Si on connaît S en fonction de ω , l'équation (2) fournit les valeurs

de ω qui correspondent à un couple C donné, et à un courant I donné, les unes appartenant aux zones du régime stable, les autres à celles du régime instable. Si alors on modifie la valeur du courant d'excitatrice, soit I' , on modifiera en général les valeurs du calage relatif ω pour la même valeur du couple C . C'est là le moyen de modifier le calage relatif des deux rotors pendant le fonctionnement même et cela d'une façon progressive.

On a porté en figure 3, les valeurs du couple C en fonction du ca-

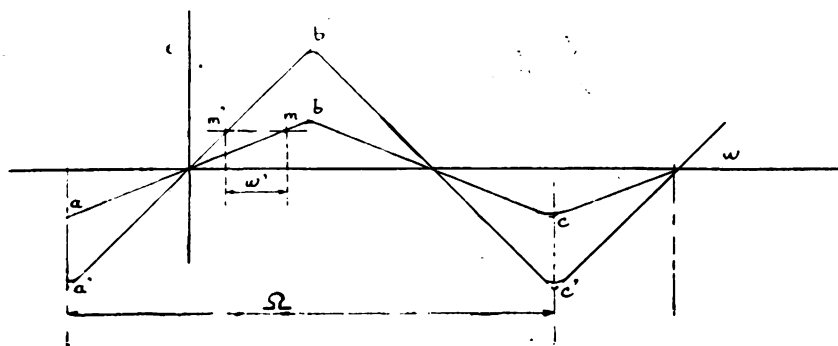


Fig. 3.

lage relatif ω de deux rotors, et soit a, b, c , la ligne relative au courant d'excitation I , et a', b', c' , celle relative au courant I' . Si alors le point m représente le point d'équilibre quand on excite avec le courant I , le point d'équilibre passera en m' quand on excitera avec le courant I' et le calage relatif sera modifié de la valeur ω' .

Il est facile, grâce à un dispositif à éclairage stroboscopique, par exemple, ou bien à un dispositif à contacts glissants de déterminer avec exactitude le calage relatif des deux demi-accouplements, alors en connaissant le courant d'excitation et en se servant d'une courbe d'étalonnage exécutée très aisément au repos, on obtient la valeur du couple transmis à chaque instant du fonctionnement. Ainsi se trouvent justifiées les quatre propriétés particulières énoncées plus haut.

Je terminerai par quelques lignes sur la « capacité de l'accouplement ».

L'accouplement sera d'autant meilleur qu'il pourra absorber un travail plus grand sans décrocher. A l'absorption d'un travail, intervient évidemment aussi le couple dû aux courants induits par variation de perméance, que l'on peut facilement amplifier moyennant des

anneaux en cuivre autour des dents polaires, ou mieux en ménageant une véritable cage d'écureuil. Mais je ne compterai pas ce contingent, et en me limitant à l'énergie qu'on peut absorber uniquement, grâce à la variation de perméance, j'appellerai « capacité » de l'accouplement la valeur :

$$\Gamma = \int_{\omega_1}^{\omega_2} C d\omega$$

où les limites d'intégration ω_1 et ω_2 sont choisies de manière à rendre maximum la valeur absolue de l'intégrale.

On a alors :

$$\Gamma = K(S_2 - S_1)l^2$$

(en supposant l toujours constant), où S_1 et S_2 sont les valeurs qui correspondent à ω_1 et ω_2 respectivement.

Soit s la surface recouverte simultanément par l'épanouissement polaire d'une dent primaire et d'une dent secondaire, la formule (2) peut s'écrire :

$$C = Kn \frac{ds}{d\omega} l^2$$

où n est le nombre de dents. Conservons la même valeur maximum de S : $S_{\max.} = ns_{\max.}$, supposons, pour la simplicité, que les épanouissements polaires aient la force d'un segment annulaire, comme l'indique la figure 2, auquel cas le couple prend une valeur

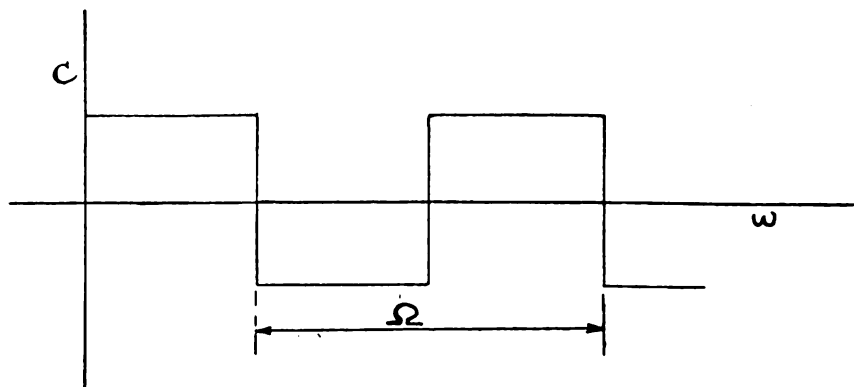


Fig. 4.

constante, tantôt dans le sens dextrorsum, tantôt dans le sens sinistrorsum comme l'indique la figure 4, et adoptons une nouvelle subdivision des dents, soit n' dents, le nouveau couple sera :

$$C' = Kn' \frac{ds'}{d\omega} l^2$$

mais $\frac{ds'}{d\omega} = \frac{ds}{d\omega}$ donc on aura $\frac{C'}{C} = \frac{n'}{n}$. Donc, en augmentant le nombre des dents n , on augmentera le couple et ceci indéfiniment si l'effet des franges magnétiques ne venait pas arrêter cette augmentation. Par contre, l'« élasticité » de l'accouplement, c'est-à-dire l'angle que le calage relatif des deux rotors peut parcourir sans que le couple change de signe, est inversement proportionnel au nombre n . La capacité Γ reste constante ; en effet : $\Gamma = Kn's' \max. I^2 = KS \max. I^2$.

Afin d'augmenter l'« élasticité » de l'accouplement sans réduire le couple C , j'interpose entre l'élément primaire et l'élément secondaire, plusieurs éléments que j'appelle « tertiaires », fous sur l'arbre comme

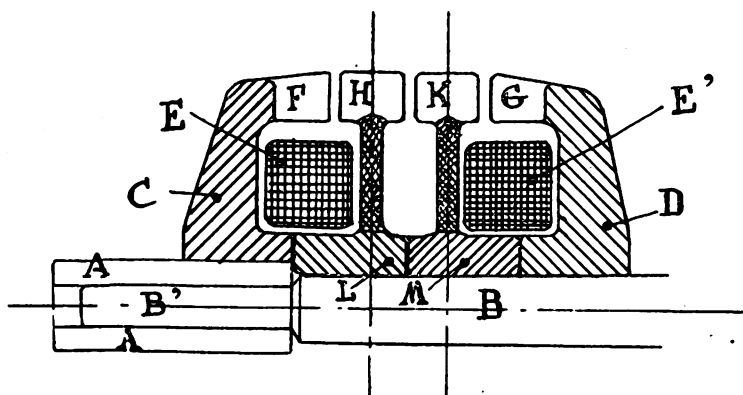


Fig. 5

l'indique la figure 5, où A et B sont les arbres, l'extrémité B' s'engageant dans A pour assurer le parallélisme des axes, où C et D sont les éléments primaire et secondaire, E la bobine, et H et K les éléments tertiaires fous sur l'arbre et dont la partie doublement hachurée n'est pas magnétique.

L'élasticité ainsi obtenue est triple de celle de l'accouplement de la figure 1 à couple égal. Ou bien si l'on veut, pour une différence de couple donnée, on obtient une différence de décalage relatif des rotors triple.

Il est évident que la « capacité » a aussi triplé.

L'expérience faite sur deux accouplements que j'ai construits a démontré que des accouplements capables d'un fort couple, d'une grande élasticité et d'une capacité notable, peuvent être obtenus sous un vo-

lume réduit, avec un matériel exigeant bien peu de main-d'œuvre et d'un prix modeste.

Il me semble que cet accouplement pourra bien remplir les desiderata que j'ai entendu formuler lors d'une récente séance de la Com-

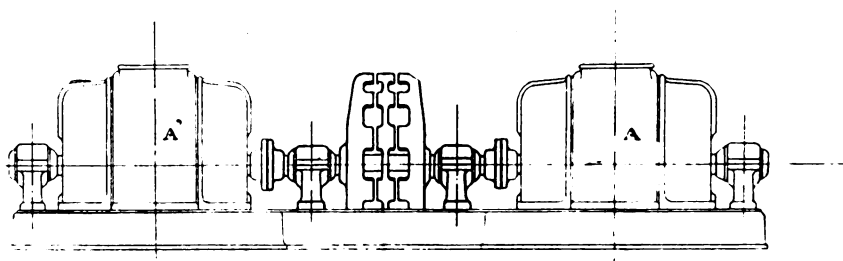


Fig. 6.

mission, par plusieurs techniciens, à propos des essais des alternateurs en opposition. La figure 6, donne une idée du dispositif qu'on pourrait alors adopter, au milieu, l'accouplement sur son propre socle et aux deux extrémités les alternateurs A et A' à essayer.

Observations au sujet de la note de M. Pestarini

par M. RIEUNIER.

Actuellement, la liaison entre le réseau à 50 p : s de l'Union d'Electricité et le réseau à 25 p : s des Chemins de fer de l'Etat se fait au moyen de 3 groupes changeurs de fréquence, comportant chacun 2 alternateurs de 5 000 kVA chacun, reliés par accouplement rigide, le stator de l'alternateur à 25 p : s étant décalable au moyen d'un moteur électrique auxiliaire et d'un treuil à vis sans fin.

La liaison est ainsi réalisée entre le réseau de l'Union d'Electricité avec ses alternateurs à axe vertical 10 000 kW l'un, 250 t/mn — commande par turbines hydrauliques — ses alternateurs à axe horizontal 40 000 kW l'un, 1 500 t/mn — commande par turbines à vapeur — et le réseau à 25 p : s du Chemin de fer de l'Etat avec ses turbo-alternateurs à vapeur 1 500 t/mn, 5 000 kW.

Ce dernier réseau subit des à-coups beaucoup plus importants en valeur relative, que ceux subis par le réseau à 50 p : s de l'Union. Est-ce qu'en pareil cas l'élasticité de l'accouplement Pestarini ne serait

pas plus nuisible qu'utile, et cette élasticité pourrait-elle être supprimée sans trop de difficultés ?

❧ Réponse de M. Pestarini.

Au sujet de l'accouplement magnétique pour frottement que j'ai présenté à la dernière séance, M. RIEUNIER pose la demande, par une note écrite, de savoir s'il est utile ou non de remplacer les accouple-

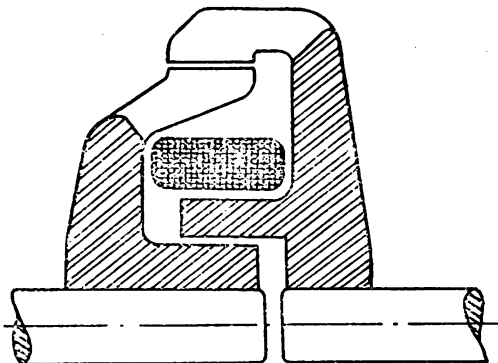


Fig. 7.

ments mécaniques ordinaires dans les gros groupes moteurs-générateurs par les accouplements que j'ai proposés.

Or, j'ai proposé mon accouplement surtout pour les essais des alter-

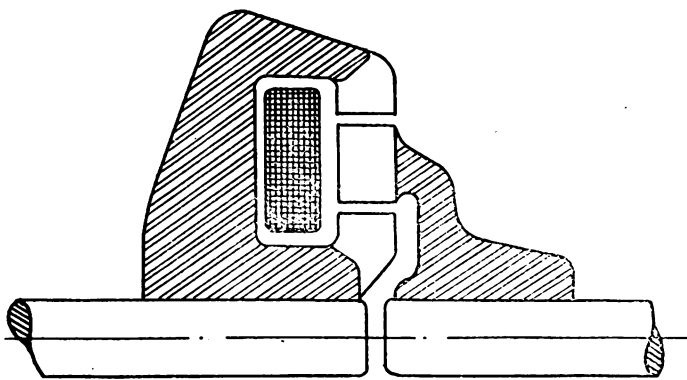


Fig. 8.

nateurs en opposition, essais qu'on ferait en plate-forme. L'application dont M. RIEUNIER parle, présenterait les avantages suivants :

- a) Un montage qui nécessite une exactitude moindre ;
- b) Possibilité de décalage relatif progressif ;
- c) Plus grand amortissement probable des oscillations pendulaires éventuelles.

Mais le prix plus élevé et la dépense continuelle quoique faible d'énergie pour l'excitation limitent son emploi aux cas spéciaux où les avantages propres de l'accouplement rendent un vrai service.

M. DARRIEUS a fait aussi remarquer que la force due à l'électro-aimant dans le sens axial des arbres serait préjudiciable à l'exactitude de l'appareil comme torsiomètre. L'on pourrait alors prévoir des billes qui supporteraient cet effort axial. Mais il y a mieux dans ce cas, car on peut faire complètement disparaître cet effort électromagnétique par une disposition appropriée du circuit magnétique et les figures 7 et 8 en donnent deux exemples.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Attribution du prix George Montefiore pour 1929.

L'association des Ingénieurs Electriciens sortis de l'Institut Electrotechnique Montefiore, nous prie de publier l'information suivante :

Les 28 et 29 septembre dernier a eu lieu à Liège la réunion du Jury de la fondation George Montefiore, due à la libéralité du grand philanthrope qui a fondé l'Institut Électrotechnique annexé à l'université de cette ville.

On sait que M. Montefiore a légué par testament à l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique qui porte son nom, une somme importante en vue de l'institution périodique d'un prix. Ce prix est décerné tous les trois ans, à la suite d'un concours international, au meilleur travail apportant une contribution à l'avancement scientifique ou technique de l'électricité, à l'exclusion des ouvrages de vulgarisation ou de simple compilation.

Le concours, dont les résultats viennent d'être proclamés, aurait dû être jugé en 1927, mais, par suite de la grande guerre, il a fallu le retarder jusqu'en 1929.

Le Jury, était composé de MM. Omer DE BAST, président, BLONDEL, BOUCHEROT, CHAUVIN, DELLA RICCIA, DRUMEAUX, FELDMANN, GILLON, LANDRY et ROOSEN.

Vingt-deux mémoires ont été présentés au concours.

Le prix, dont le montant s'élevait à 29.000 francs, a été fractionné. Quatre mémoires ont été couronnés. Ce sont ceux de MM. Algeri MARINO, ingénieur à Rome, H. PARODI, ingénieur à Paris, PESTARINI, ingénieur à Paris, EVANS et WAGNER, ingénieurs à Pittsburgh.

Le prochain concours aura lieu en 1932 et comportera un prix de 21.500 francs.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ

MANUELS

L'Electricité à la Maison, par E. MAREC. Edité par J.-B. Baillière et fils, 19, rue Hautefeuille, à Paris. Un volume 19×12^{cm} de 462 pages, 451 figures, année 1929. Prix : 24 francs. — *Don des Editeurs.*

Manuel du Dessinateur Industriel, par NUMA Morise. Edité par J.-B. Baillière fils, 19, rue Hautefeuille, Paris, VI^e. Un volume 16×11^{cm} cartonné, de 608 pages, 110 figures. — Don des éditeurs. Prix : 30 francs.

DIVERS.

L'Offrande à Mercure, par ROSZAK Charles. Edité par la Librairie de la Revue Française, 11, rue de Sèvres, Paris, VI^e. Un volume broché de 18×12^{cm}, 320 pages. — Don de l'auteur. Prix : 12 francs.

Index Généralis 1928-1929. *Editions Spès* publié sous la direction de R. DE MONTESSUS DE BALLORE. Un volume de 2380 pages 19×13^{cm}. — Don des Editions Spès, 17, rue Soufflot, Paris, V^e. Prix : 165 francs.

Les Principes de la Philosophie Thomiste : La Critique de la Connaissance, par Joseph DE TONQUÉDEC. Edité par Gabriel Beauchesne, Paris, 117, rue de Rennes. Un volume de 565 pages, 23×14^{cm}, broché. — Don de l'éditeur.

Standards. Le Travail américain vu par un ouvrier français, par H. DUBREUIL. Edité par Bernard Grasset, à Paris, 61, rue des Saints-Pères, 7^e. Un volume de 425 pages, 18×12^{cm}, broché. — Don de l'éditeur. — Prix : 15 francs.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

PRODUCTION ET APPLICATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ

Macchine elettriche - costruzione funzionamento e prove. — Parte prima : *Preliminari e generalità sulle costruzioni elettromeccaniche.* — Parte seconda : *Preliminari e generalità sulla prova delle macchine elettriche*, par Ing. Angelo BARBAGELATA, professore al Politecnico di Milano. Un volume $25^{\text{cm}} \times 18^{\text{cm}}$, de 254 pages et 203 figures. 2^e édition. 1929. — Editeur : Libreria editrice politecnica di Cesare Tamburini fu Camillo, Milano, via G. Pascoli, 64, Piazza Cavour, 2. (Don de l'auteur)

Cet ouvrage, reproduisant des leçons faites aux élèves ingénieurs de la Section d'Électricité de l'Ecole Polytechnique de Milan, l'auteur donne les règles fondamentales de la construction des différents genres de machines ; il étudie les appareils de mesure, les méthodes d'essais et leur application aux épreuves des machines.

Des chapitres sont spécialement consacrés aux machines synchrones et asynchrones, aux transformateurs et aux moteurs à collecteurs.

ELECTROCHIMIE-ELECTROMÉTALLURGIE.

Recherches sur les réactions chimiques ayant pour siège les électrodes dans les phénomènes d'électrolyse, et sur quelques combinaisons métalliques qui prennent naissance dans ces conditions. — Thèse pour l'obtention du grade de docteur ès sciences physiques, présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Strasbourg, par A.-P. ROLLET. Volume $14,5^{\text{cm}} \times 23^{\text{cm}}$ de 125 pages, 41 figures. 1929. — Editeur : Masson et C^e, libraires de l'Académie de médecine, 120, boulevard Saint-Germain, Paris, 5^e.

Cette thèse constitue une importante contribution à l'étude des réactions dont la pile électrique est le siège. L'auteur a étudié notamment une méthode particulière d'analyse électrochimique des degrés d'oxydation des électrodes, et a poursuivi l'étude du peroxyde de plomb dans le cas des accumulateurs. Nous rappelons que la théorie des accumulateurs fait, depuis longtemps, l'objet d'une discussion entre des spécialistes aussi qualifiés que M. FÉRY et M. JUMAU. Les travaux personnels de M. ROLLET paraissent devoir éclairer la question. Accessoirement, il a construit un appareil très simple — un fréquence-mètre électrolytique qui a permis de mettre en évidence les phénomènes d'électrolyse en courant alternatif.

RECHERCHES PHYSIQUES

Ondes et électrons. par Pierre BRICOUR, docteur ès sciences, répétiteur à l'Ecole Polytechnique. Un volume $12^{\text{cm}} \times 18^{\text{cm}}$, de 215 pages et 57 figures, de la « Collection Armand Colin ». 1929. Prix : broché, 9 fr. ; relié, 10 fr. 25. — Editeur : librairie Armand Colin, 103, boulevard Saint-Michel, Paris (5^e). (Don de l'éditeur).

L'auteur expose d'une façon claire et concise les théories modernes sur la structure de la matière et sur la nature et les propriétés de l'électricité. Il étudie, en

ayant recours à la théorie des vecteurs et au calcul mathématique, les découvertes de la physique contemporaine, expose la théorie de la relativité restreinte. Cet ouvrage est un véritable manuel moderne et logiquement ordonné de physique atomique s'adressant à l'étudiant comme au technicien.

MATHÉMATIQUES

Das rechnen mit vektoren in der Electro-Technik, von R. LUNDHOLM. Centraltryckeriet, Stockholm, 1928. Fascicule $16^{\text{cm}} \times 24^{\text{cm}}$ de 99 pages, 27 figures. — Rédigé en allemand et consacré au calcul vectoriel et à son application à l'électrotechnique.

A general electromagnetic theory of electric machines, by Fredrik DANIELGREN. Centraltryckeriet, Stockholm, 1929. Fascicule $16^{\text{cm}} \times 24^{\text{cm}}$ de 78 pages, 5 figures, 2 appendices. — Rédigé en anglais et consacré à une théorie des machines électriques basée sur les équations de Lagrange et l'application du calcul vectoriel.

Elektriska Kraftöverföringars dynamiska stabilitet, av Ivar HERLITZ. Centraltryckeriet, Stockholm, 1928. Fascicule $16^{\text{cm}} \times 24^{\text{cm}}$ de 53 pages, 20 figures. — Rédigé en anglais et traitant du réglage des alternateurs dans divers cas de la pratique.

CONGRÈS

La corporation de l'acier aux Etats-Unis. Etude industrielle, économique et sociale, par Arundel COTTER. — Traduit de l'anglais avec l'autorisation de l'auteur, adapté et commenté par André AUDE. Un volume $22^{\text{cm}} \times 14^{\text{cm}}$ de 237 pages et une phototypie hors texte. 2^e édition, 1923. Prix : 20 fr. — Editeur : librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris (5^e). (Don de l'éditeur).

La « Corporation de l'acier », née en 1901 de la fusion de dix des plus importantes Compagnies métallurgiques des Etats-Unis — dont la C^{ie} Carnegie — et représentant à son début les deux tiers de la puissance de production de son pays, qui emploie 275.000 ouvriers, n'a pas cessé de se développer depuis sa création et sa production d'acier et de fonte a atteint le double de ce qu'elle était il y a vingt ans.

L'auteur a écrit l'histoire de son développement, de ses luttes pour écraser la concurrence, de ses efforts pour la conquête des marchés extérieurs, des difficultés qu'une entreprise aussi gigantesque devait nécessairement rencontrer, des défiances et des hostilités qu'elle a soulevées, des moyens à la fois habiles et empreints de modération que ses chefs ont su employer pour assurer son succès.

Il nous apprend la part immense prise par cette puissante Compagnie dans l'armement des Alliés durant la guerre, l'aide inestimable qu'elle leur a apportée pendant cette période critique et comment elle a essayé de réagir contre le renchérissement de la vie en cherchant à stabiliser ses prix de vente..

L'industrie de l'acier en France (simple exposé technique et économique), par J. TRINOT-LASPIÈRE, ingénieur civil des Mines. Volume $25^{\text{cm}} \times 16^{\text{cm}}$ de 238 pages, avec 54 dessins, 5 cartes, 6 graphiques, 20 magnifiques planches photographiques hors texte et une statistique détaillée de la production minière et sidérurgique française, comparée à celle des principaux pays. 2^e édition, 1917. Prix broché : 16 fr. — Editeur : librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris (5^e). (Don de l'éditeur).

L'auteur expose dans leurs grandes lignes les procédés de fabrication de l'industrie sidérurgique, c'est-à-dire l'élaboration du métal depuis le moment où le

mineral entre à l'usine jusqu'au moment où celle-ci livre le produit fini, ainsi que les conditions économiques qui, en France, régissent leur évolution.

Ces deux points de vue, technique et économique, sont inséparablement liés et l'étude de leur mutuelle dépendance offre le plus vivant intérêt. L'auteur qui donne dans cet ouvrage un tableau de ce qu'était l'industrie de l'acier en France au moment où la guerre éclata, car ce livre était à l'impression en 1914, montre quelles luttes obstinées ont dû soutenir les dirigeants de notre sidérurgie pour mener leur œuvre à bien au milieu des difficultés qu'ils ont rencontrées.

ENSEIGNEMENT.

Problèmes de Statique graphique et de Résistance des matériaux, à l'usage des élèves de l'Institut électrotechnique et de mécanique appliquée, par Louis ROY, correspondant de l'Institut, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Toulouse. Un volume 23^{cm} × 14^{cm}, de 120 pages et 48 figures, 1929 Prix : 30 fr. Editeur : Gauthier-Villars et C^{ie}, 55, quai des Grands-Augustins, Paris, 6^e. (Don des éditeurs).

Ce recueil de problèmes est exactement adapté au Cours de Mécanique appliquée, Tome II : Statique graphique et Résistance des matériaux. Volume de 213 pages, Paris, Gauthier-Villars, 1921, publié par l'auteur ; il contient les sujets de compositions données depuis une douzaine d'années à l'Institut électrotechnique et de Mécanique appliquée de l'Université de Toulouse, rangés dans les dix chapitres suivants : I. Dynamiques et funiculaires ; applications à la statique du corps solide. — II. Systèmes articulés. — III. Centres de gravité et moments d'inertie. — IV. Déformations simples. — V. Déformations composées. — VI. Ligne élastique. — VII. Poutres à travées solidaires. — VIII. Poutres chargées de bout. — IX. Arcs. — X. Enveloppes.

DIVERS

L'offrande à Mercure. — Remarques sur les affaires, par Charles ROSZAK. Un volume 12^{cm} × 18^{cm} de 217 pages. Prix : 12 fr. — Librairie de la Revue Française, Alexis Redier, éditeur, 11, rue de Sèvres, Paris. (Don de l'auteur).

Dans la préface de l'ouvrage M. Louis Forest présente l'auteur, l'éminent technicien, le penseur profond, « l'Ingénieur philosophe » qui, en publiant ses pensées, ses réflexions et ses observations, a donné aux futurs chefs d'entreprises les plus utiles enseignements pour la conduite des affaires et la connaissance des hommes.

Ce qu'est l'ouvrage ? Les titres des principaux chapitres le disent : Le Commerce des hommes ; Le commerce des choses ; L'argent ; L'esprit d'entreprise ; Le métier de chef de maison ; Les collaborateurs ; Produire ; Réussir.

En le lisant on comprend que M. Louis Forest ait terminé sa préface par cette phrase :

« Et « l'offrande à Mercure », dieu du commerce, eût pu aussi être l'Offrande au dieu de l'esprit. »

IL Y A 30 ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 6 décembre 1899

Présidence de M. J. Violle, *Président*.

M. X. Gosselin fait une communication sur « Les Récents dispositifs pour l'éclairage par arc » dans laquelle il signale les avantages du montage de trois arcs en série sur 110 V. Sans résistance additionnelle de réglage, en montrant comment les systèmes Hegner, d'une part, Vigreux et Brillié, de l'autre, permettent d'obvier aux surintensités dangereuses en cas d'arrêt de l'un de ces arcs.

Après quelques observations de MM. Aliamet et E. Sartiaux sur la diminution de stabilité des arcs résultant de ce régime M. Hegner fait un exposé théorique d'après lequel la régularité et la stabilité des arcs en série, résultent surtout de la construction des lampes et dans le cas de la lampe Hegner de l'existence d'un rhéostat automatique sur le circuit d'alimentation.

M. Lauriol fait une communication sur « l'utilisation de la chaleur dégagée par la combustion des ordures ménagères pour la production de l'électricité ».

La production moyenne de gadoues est à Paris de 0,250 tonnes par an et par habitant et comme la combustion d'une tonne de gadoues donne environ 30 kWh, on peut produire, en utilisant de combustible, 5 kWh, par an et par habitant ce qui correspond approximativement à la consommation d'énergie électrique actuelle.

Mais, l'économie qui serait susceptible d'être réalisée, dépend de la concordance entre les régimes de production des gadoues; d'une part de consommation de l'énergie électrique; d'autre part, aux différentes époques de l'année. M. Lauriol, en évaluant dans un certain nombre de cas le bénéfice réalisé par kWh utilisé, conclut que ce bénéfice peut atteindre 4,62 centimes sans descendre, même dans le cas le plus défavorable, en dessous de 1,93 centimes par kWh.

TABLE MÉTHODIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME IX (4^e SÉRIE)

CLASSIFICATION

- | | |
|---|---|
| <p>A. — Production et utilisation mécanique de l'électricité.</p> <p>B. — Eclairage et chauffage. Radiations diverses.</p> <p>C. — Chimie, électrochimie, électrometallurgie, piles, accumulateurs.</p> <p>D. — Appareillage général, canalisations, traction.</p> <p>E. — Télégraphie, téléphonie, transmission par ondes.</p> <p>F. — Recherches physiques, physiologie. — Appareils et méthodes de mesure.</p> | <p>G. — Législation.</p> <p>H. — Mathématiques, Mécanique rationnelle et mécanique appliquée.</p> <p>I. — Congrès, expositions, actes officiels, annuaires, études économiques, inventaires, statistiques, commémorations.</p> <p>J. — Formulaires, aide-mémoires, manuels. Dictionnaires.</p> <p>K. — Enseignement et divers.</p> <p>L. — Biographie.</p> <p>M. — Communications et informations diverses.</p> |
|---|---|

N. B. — *Le numéro en italique dans les ouvrages offerts et la bibliographie se réfère au compte rendu de l'ouvrage.*

A. — PRODUCTION ET UTILISATION MECANIQUE DE L'ELECTRICITE

1^o COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ.

	PAGES
Accouplement magnétique sans frottement, par M. Pestarini	1298
Centrales thermiques américaines, par M. Mathivet	937
Observations, par MM. Duval, Darrieus et Genissieu	935
Echauffement-limite des machines électriques et notion de surcharge (discussion du rapport de M. Langlois-Berthelot), MM. Boucherot, Roth, Girault, Langlois, Darrieus, Belfils et de Pistoye	17
Emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et les postes de transformateurs, par M. Neu.	542
Observations de M. Roth	548
Réponse de M. Neu	549
Etude des différents systèmes d'excitation et leur influence sur la stabilité de marche des réseaux (discussion du rapport de M. Belfils), par MM. Fallou, Darrieus et Belfils	78
Forces hydrauliques de l'Afrique équatoriale française, par M. Darnault.	1283
Les modèles mécaniques en électrotechnique, leur application aux problèmes de stabilité, par M. Darrieus	794
Moteurs asynchrones synchronisés (Discussion du rapport de M. Le Monnier) : MM. Berger, Mathivet, Bunet, Boucherot, Gratzmuller, de Pistoye, Bergeron, Roth, Le Monnier et Belfils	27

	PAGES
Moteurs à cage d'écureuil (Les embrayages automatiques appliqués au démarrage des), par M. Bethenod)	434, 923
Moteurs électriques de laminoirs irréversibles à une seule vitesse (Discussion du rapport de M. Grivet) : M. Jung	67
Procédés de démarrage des moteurs asynchrones (Discussion du rapport de M. de Pistoye) : MM. Defflassieux, Belfils, de Pistoye, Bunet et Martineau	60
Vœu adopté par la 1 ^{re} section pour être transmis à la 4 ^e	67
Propagation des ondes dans les enroulements (Discussion du rapport de M. Ledoux) : MM. Flegler, Ledoux, Fallou, Darrieus, Bunet, Benoît, de Pistoye	85
Puissance réactive (effets et améliorations de la), réponse au questionnaire du Comité pour l'amélioration du facteur de puissance de la Conférence des Grands Réseaux, par M. Fallou	101
Utilisation rationnelle de la puissance du vent, par M. Neu	570

2° TRAVAUX DES SECTIONS

Embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs d'induction à cage d'écureuil	434-923
Programme de la Semaine d'octobre 1929	438
Utilisation des marées	439
Essais de démarrage des moteurs asynchrones	440
Essais en récupération des alternateurs synchrones	768
Alternateur auto-excitateur sans connexions entre stator et rotor. Circuits du rotor à collecteur fermé sur self-inductances. Rôle de cet alternateur comme excitatrice rotorique de machines asynchrones	769

3° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Applications de l'Electricité aux Mines, par G. Hacault	671	789
Centrales électriques, par F. Drouin	107	109
Construction économique de la machine électrique (La), par Milan Vidmar	555	1252
Intrebuintarea pacurei ca combustibil la C. F. R., par Aurel Lănescu	557	
Machine Elettrica, par Barbagelata	1251	1309
Problème de la canalisation du secteur des cataractes du Bas-Danube, par G. Vasilescu	557	
Quelques considérations générales sur l'utilisation rationnelle des lignites de Roumanie, par I. Bujoiu	557	
Report of tabulating the results of Heat, par Eugene Trials.....	558	

4° IL Y A TRENTÉ ANS

Réaction d'induit dans les machines dynamo-électriques, par M. Picou. Discussion : MM. Korda et Brunswick	340
Utilisation de la chaleur dégagée par la combustion des ordures ménagères pour la production de l'électricité, par M. Lauriol	1312

B. — ECLAIRAGE ET CHAUFFAGE

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Actinisme réel en cinématographie panchromatique et procédés d'éclairage employés pour les prises de vue sur film panchromatique (Discussion des rapports de MM. Didice et Abgrall) : MM. Leblanc, Roux, Dourgnon, Cabel, Bossu, Château, Dumont, Matigot	247
---	-----

	PAGES
Actinothérapie en 1928 (1'), par le Docteur J. Saidman	660
Balisage nocturne des itinéraires d'avions, par M. Abadie	749
Compte rendu sur la propagande d'éclairage, par M. Cohu	756
Croissance des végétaux en lumière artificielle, par M. Truffaut	810
Dispositifs antiéblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution, par MM. P. Waguët et Dourgnon ..	616
Eclairage des grandes surfaces par projecteurs, par M. Massing	625
Eclairage des studios et ses perfectionnements en 1928 (L'), par M. Cabet ..	736
Industrie des enseignes lumineuses, par M. Fonsèque	747
Lampes à incandescence, par M. Maisonneuve	717
Lampes à vapeur de mercure (Résultats de quelques essais récents sur les), par M. M. Leblanc	710
Législation de l'éclairage (La), par M. Partridge	657
Luminaires et éclairage intérieur, par M. Dourgnon	647
Mesure du rayonnement ultra-violet (présentation et discussion du rapport de M. Maurice Leblanc)	246
Méthodes de calcul dans la technique de l'éclairage, par M. Wetzel	650
Optique physiologique (Les progrès de l'), par M. le Docteur Emile Haas ..	728
Optique des surfaces diffusantes, par MM. P. Waguët et Dourgnon	939
Photométrie (Etat actuel de la), par M. Jouaust	720
Projecteurs de lumière à miroir parabolique et dispositifs antiéblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution (Discussion des rapports de MM. Waguët et Dourgnon) : MM. Bossu, Roux, Waguët et Matigot	260
Projecteurs de lumière à miroir parabolique. Principes applicables aux projecteurs d'automobiles (Etude sur les), par MM. P. Waguët et Dourgnon	599
Projecteurs et phares	653
Tubes luminescents (Eclairage par les), par M. Darmois	1046
Tubes à néon à basse tension à cathode incandescente, par M. Maurice Leblanc	655
Unités radiologiques (Etat actuel de la question des). Présentation du rapport de M. Dauvillier	247

2° TRAVAUX DES SECTIONS

Mesures photométriques de tubes à néon et en général de sources de lumière colorées à partir d'un étalon de lumière	441
Eclairage des rues	442
Eclairage des grandes surfaces par projecteur	443
Emploi des tubes à néon à grande intensité au balisage des champs d'aviation	771
Eclairage des studios	771

3° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Eclairage, par L. Galine et B. Saint-Paul	1251
---	------

4° IL Y A TRENTE ANS

Etude de la répartition lumineuse des lampes à arc, spécialement des lampes munies de globes et de réflecteurs, par M. Laporte	676
Récents dispositifs pour l'éclairage par arc (Les), par M. X. Gosselin. Discussion : MM. Alliamet, Hegner et Sartiaux	1312

C. — CHIMIE. — ELECTROCHIMIE. — ELECTROMETALLURGIE PILES. — ACCUMULATEURS

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

	PAGES
Accumulateur au plomb (L'), par M. Rollet	832
Remarques de M. Féry	839
Electrolyse aqueuse des chlorures alcalins (présentation du rapport de M. Levasseur)	266
Fabrication électrolytique des chlorates alcalins (présentation du rapport de M. Bunet)	267
Electrolyse du chlorure de sodium avec cathode de mercure (présentation du rapport de M. Bunet)	267
Machines à souder par résistance (projet de définition des). Présentation du rapport de M. Mathieu	268
Ozone et ses applications (L'), par M. Otto	129
Redresseurs à anode colloïdale, par M. André	961
Redresseurs de courants alternatifs (Les), par M. A. Soulier	381
Redresseur Rectox à oxyde cuivre (Le), par M. Maurice Leblanc	1061

2° TRAVAUX DES SECTIONS

Redresseur Rectox (Le)	207
Redresseurs à anode colloïdale	208
Electrolyseurs Pechkranz	772
Comparaison des procédés d'extraction électrolytique de l'iode avec les procédés actuels	775
Fours à haute fréquence à étincelle et leur facteur de puissance	777
Théorie de l'accumulateur au plomb (La)	779

3° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Aluminium et ses alliages (L'), par l'Aluminium français	221	223
Electrochimie et électrometallurgie (L'), par M. Levasseur		223
Energie électrique de demain (L'), par A. Berthier	334	558
Etude résumée des accumulateurs électriques, par L. Jumaù	107	109
Leçons sur la conductibilité des électrolytes, par Darmon	555	1252
Recherches sur les réactions chimiques ayant pour siège les électrodes dans les phénomènes d'électrolyse, et sur quelques combinaisons métalliques qui prennent naissance dans ces conditions, par A.-P. Rollet.		1309

D. — APPAREILLAGE GENERAL. — CANALISATION TRACTION

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Détermination des courants de court-circuit dans un réseau à l'aide d'un modèle électrique, par J.-C. van Slaveren	678
Emplois des condensateurs dans les réseaux de distribution, par M.-P. Bunet	853
Etude générale sur les bois employés en électrotechnique. Méthode de contrôle-traitement, par M. Vitte	1221
Foudre et les lignes électriques (La), par M. Dauzère	575
Freinage électrique en courant continu des trains sur pentes (Le), par M. Gratzmuller	1069
Limitation des court-circuits dans les réseaux à haute tension (La), par M. Fallou	883

	PAGES
Postes extérieurs, par M. Barillot	843
Protection sélective dans les réseaux (Discussion des rapports de MM. Iliovici et Fallou) : M. Kloninger	330
Réglementation du démarrage des moteurs asynchrones (Examen et adoption du vœu de la 1 ^{re} Section au sujet de la). Considération de M. de Pistoye	295
Tarification de l'énergie réactive, par M. Ailleret	270
Tarification de l'énergie réactive (Discussion du rapport de M. Ailleret) : MM. Iliovici, Brylinski, Ailleret, de Pistoye, Villiers, Darrieus, Girault, Budeanu, Demany	274
Traction avec récupération (Discussion) : MM. Della Riccia, Somajni, Andriès, Demany, Gratzmuller	295

2° TRAVAUX DES SECTIONS

Emploi des moteurs à cage d'écureuil.....	208
Projet de réglementation concernant le courant de démarrage des moteurs à courant alternatif dans les installations électriques de première catégorie	209
Emploi des condensateurs sur les réseaux de distribution.....	444
Relais régulateurs de charge et leurs applications	445
Sur les distances à observer entre les différents éléments des installations à haute tension	447
Détermination des courants de court-circuit à l'aide d'un modèle électrique	780-784
Emploi des couteaux de sectionnement pour la rupture de la marche en parallèle des transformateurs	780

3° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Encyclopédie du Caoutchouc et des Industries qui s'y rattachent. Edité par le Syndicat du caoutchouc et des industries qui s'y rattachent. 221	450
Essais d'interrupteurs dans l'huile, 1927. Publiés par l'Union des Syndicats de l'Electricité	450
Isolateurs en porcelaine, par le Professeur G. Benischke	559
Übertragungs-technik, par R. Winzheimer.....	1251

4° IL Y A TRENTE ANS

Applications industrielles des transformateurs redresseurs de Maurice Leblanc dans les installations de la Compagnie des Chemins de fer du Nord, par MM. Aliamet et Sartiaux	676
Coupe-circuit à interrupteurs (Les), par M. Brunswick. Discussion : MM. Boucherot, Hillairet, Grosselin et Zetter	112-224
Etude sur la transmission et la distribution de l'énergie par les courants alternatifs (suite), par M. Maurice Leblanc.....	224-340-792
Interrupteurs Wehnelt et ses applications (L'), par M. Hospitalier	452-563
Parafoudres sur les canalisations électriques (Les), par M. Bochet	452
Tramways à accumulateurs de la Ville d'Ostende, par Sarcia	224

E. — TELEGRAPHIE. — TELEPHONIE. — TRANSMISSIONS
PAR ONDES

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Alliages à haute perméabilité (Les), par M. Chauchat	1091
Centraux téléphoniques (L'évolution des procédés de fourniture de courant dans les), par M. B. Salomon	897

	PAGES
Filtrage des courants redressés (Contribution à l'étude du), par M. Demont- vignier	982
Liaison radiotéléphonique Paris-Buenos-Ayres par ondes courtes projetées (La), par M. Villem	1107
Ondes de 10 à 20 cm. (Sur les), par M. Beauvais	503
Phototélégraphie d'amateur (La), par M. R. Mesny	511
Protection du synchronisme sur les transmissions radiotélégraphiques Baudot-Verdan, par M. Ch. Bonnin	974
Relations téléphoniques entre Paris et les localités de la proche région pari- sienne. Discussion du rapport de M. Caillez et M. Reynaud-Bonin	396
Remise à l'heure des horloges et commandes à distances diverses par les lignes téléphoniques, par M. Lavet	679
Sférographe (Le). Discussion du rapport de M. Chauveau par M. Reynaud- Bonin	395
Taxiphone (Le), par M. de la Moricière	371
Téléphone automatique rural, par M. Chauveau	195
Télétype et le télémixte (Le). Discussion des rapports de MM. Bonnin et l'aul Joly : MM. Chauveau, Reynaud-Bonin, Bonnin, Clavier	389
« Télétype » dans les bureaux télégraphiques à faible trafic et résultats d'expériences (Considérations sur l'emploi de l'appareil), par M. Mercy.	705
Transformateurs téléphoniques (Note sur les), par M. Chavasse	553-1190
Transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes, par M. Fayard	1146

2^o TRAVAUX DES SECTIONS

Téléphone automatique rural (Le)	213
Lampes à 3 électrodes (Les)	214
Taxiphone (Le)	215-371
Etudes faites sur les transformateurs téléphoniques au service d'études et de recherches techniques des P. T. T.	553-1190
Programme de la Semaine d'octobre 1928	554
Remise à l'heure des horloges par lignes téléphoniques	639-786
Télégraphie à fréquences acoustiques	787

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Câbles téléphoniques pour longues distances, par A. Engelhardt	336
Die Ausbreitung der electromagnetischen, par A. Sacklowski	337
Données numériques de radio-électricité, par R. Mesny	107 336
Onde électromotrice (L'), par L. Aguillon	110
Zur theorie des Fernsprechverkehrs, par Von K. Frei.....	337

F. — RECHERCHES PHYSIQUES. — PHYSIOLOGIE
APPAREILS ET METHODES DE MESURE1^o COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

Appareils à lecture directe pour la mesure des champs magnétiques « Gauss- mètre », par M. Dupouy.....	220-348
Chauffage par induction, par M. Bunet. <i>Errata</i>	398
Chauffage par induction (Discussion du rapport de M. Bunet): MM. Ribaud, Brylinski, Bunet, Gutmann.....	398
Définition des capacités (Sur la), par M. Ilievici.....	1158
Définition et mesure de la puissance réactive (Discussion au sujet du questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance): MM. Ilievici, Darrieus, Gi- rault, Brylinsky, Tournayre, Budeanu, Liénard.....	413

PAGES

Dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celle de Boucherot, par M. P. Bunet.....	1179
Dispositifs permettant d'obtenir les composantes symétriques des courants, des tensions ou des puissances dans un système polyphasé sans l'emploi de filtres (Discussion du rapport de M. Ilievici) : MM. Darrieus, Ilievici	433
Eclateurs de fours à haute fréquence (Discussion du rapport de M. Dufour) : MM. Gutmann et Dufour.....	407
Procédé permettant la détermination des propriétés magnétiques des tôles aux faibles inductions en courant alternatif, par MM. Jouaust et P. Waguet.....	1293
Projet de clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance, par M. de la Gorce.....	1187
Production du froid par l'effet Feltier, par M. Turettini.....	670-1267
Spintermètres (Résultats obtenus au Laboratoire Alsthom par la comparaison de), par M. Krieger.....	232
Vérifications récentes de la mécanique ondulatoire dans le cas du mouvement des électrons, par M. Maurice de Broglie.....	695
Universalité nécessaire du système métrique absolu (De l'), par M. F. Bayle.....	1020
Vues modernes sur l'Electrostatique, par M. Chaumat.....	1168

2° TRAVAUX DES SECTIONS

La puissance réactive et les oscillations de l'énergie intrinsèque.....	215
Un appareil à lecture directe pour la mesure des champs magnétiques « Gaussmètre ».....	220-348
La puissance réactive et oscillation de l'énergie.....	664
Propagation du froid, par l'effet Feltier.....	670-1267

3° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Approximations dans les mesures physiques et dans les calculs numériques qui s'y rattachent, par Colardeau.....	555	790
Comment aborder le problème de la Matière ?, par R. Ferrier.....	555	
Compteurs d'électricité (Les), par Fichter R.-M.....	449	1253
Données numériques d'électricité, magnétisme, électrochimie, par R. Audubert, Buffat, Durand, Foex et de Massacré.....	107	337
Electron et les applications de l'électricité (L'), par M. Boll.....	671	674
Empfindliche Galvanometer für Gleich und Wechselstrom, par O. Werner.....	1251	
Hochspannungs technik, par le Dr A. Roth.....	222	
Introduction à l'étude de la Physique théorique, par R. Fortrat....	671	791
Introduction à la Théorie des quanta. Les équations de la mécanique et de l'électronique, par MM. Boll et Salomon.....		789
Introduction à la Physique des Rayons X et gamma, par Maurice de Broglie et Louis de Broglie.....	107	672
Magnétisme (Le), par F. Weiss et G. Foex.....	334	561
Matière, électricité, radiations, par M. Boll.....	334	673
Newton, Maupertuis et Einstein, par F. Prunier.....		1251
Nouvelle Mécanique des Quanta (La), par G. Birtwistle.....		1251
Ondes et électrons, par F. Bricoul.....	671	1309
Ondes et mouvements, par L. de Broglie.....		555
Principi Scientifici di Elettrotecnica, par L. Lombardi.....		1251
Protection contre les effets nuisibles de l'électricité, par F.-G. de Neville et A. Hardy.....		110
Scientific Papers, par James-Clek Maxwell.....		107
Temps absolu et l'Espace à quatre dimensions (Le), par Sévin E.....		108
Theoretical and Experimental Researches on Electric Resistance Welding, by Takesi Okamoto.....		790
Théorie électrique moderne (La), par Norman-Robert Campbell.....		108
Théorie ionique de l'excitation des tissus vivants, par P. Lasareff.....		337
Théorie des quanta de lumière (Sur la), par Al. Froca.....		451

	PAGES
Théorie quantique des spectres. La relativité, par N.-R. Campbell.....	108
Traité de Physique, par O.-D. Chwolson.....	449 673

4^e IL Y A TRENTE ANS

Moteur O'K, par M. O'Keenan.....	1256
Variation de la résistance du platine en fonction de la température, par Draveau	1256
Vérification expérimentale de l'identité des vitesses de propagation des ondes hertziennes dans l'air et le long des fils, par M. Gutton, communication présentée par M. Abraham.....	792

G. — LEGISLATION

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Electricité. Notions de droit et décisions de jurisprudence, par A. Remaury et Pierre Trolley de Frévaux.....	334 559
Houille Blanche, par A. Remaury.....	334 560

H. — MATHEMATIQUES. — MECANIQUE RATIONNELLE
MECANIQUE APPLIQUEE

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Das rechnem mit vektoren in der Electro-technik, par R. Lundholm.....	1310
A general electromagnetic theory of electric machines, par F. Dahlgren..	1310
Elektriska kraftoverforingars dynamiska stabilitet, par I. Herlitz.....	1310

I. — CONGRES. — EXPOSITION. — ACTES OFFICIELS
ANNUAIRES. — ETUDES ECONOMIQUES. — INVENTAIRES
STATISTIQUES. — COMMEMORATIONS

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Annuaire de la Chambre syndicale des Forces hydrauliques de l'Electro-métallurgie, de l'Electrochimie et des industries qui s'y rattachent....	335
Compte rendu du 2 ^e Congrès international de l'Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique.....	671
Compte rendu du XXI ^e Congrès international de Tramways, de Chemins de fer d'intérêt local et de transports publics automobiles.....	334 675
Compte rendu de la Réunion de la Commission internationale d'éclairage aux Etats-Unis, en septembre 1928, par M. Maurice Leblanc.....	525
Corporation de l'Acier aux Etats-Unis (La), par Arundel Cotter.....	555 1310
Dictionar Francez-Roman, par Saineanu C.....	334
Dictionar Roman-Francez, par Saineanu C.....	334
Industrie de l'Acier en France (L'), par J. Tribot-Laspière.....	555 1310
Siemens Jahrbuch 1928.....	334 560

J. — FORMULAIRES. -- AIDE-MEMOIRES. — MANUELS
DICTIONNAIRES.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Agenda Dunod 1929. Construction mécanique, par J. Izart.....	108
--	-----

	PAGES
Agenda Dunod. Electricité (aide-mémoire pratique de l'électricien), par L.-D. Fourcault.....	108 339
Agenda Dunod 1929. Physique Industrielle, par J. Izart.....	339
Agenda Dunod 1929. Travaux publics, par E. Aucamus.....	108
Comment on devient friseur, par Champly R.....	555 1253
Comment utiliser l'électricité dans la maison, par P. Maurer.....	221 674
Dictionnaires techniques illustrés, par A. Schiömann.....	108 338
Dictionary of applied Physics Light Sound Radiology, par sir Richard Glazebrook	449 674
Dictionary of applied Physics Light Sound Electricity, par sir Richard Glazebrook	449 674
Electricité à la main (L'), par E. Marec	1308
Manuel du dessinateur industriel, par N. Morise.....	1254
Manuel pratique des batteries de démarrage, édité par Fulmen.....	108
Nouveau dictionnaire allemand-français, français-allemand, par K. Rotteck, G. Kister et Meusch.....	221
Nouveau dictionnaire anglais-français, français-anglais, par J.-M. Langletlin.....	221
Nouveau dictionnaire français-italien, italien-français, par P. Rouede et Lacombe	221
Nuevo diccionario frances-español y español-frances, par V. Salva.....	221

K. — ENSEIGNEMENT ET DIVERS

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Affaires et les Hommes (Les), par Ph. Girardet.....	335 562
Corso teorico-pratico di Elettrotecnica, par L. Lombardi.....	1251
Cours d'Electricité industrielle, par A. Defretin.....	556 791
Cours élémentaire d'électricité industrielle, par H. Bernardeau.....	671 1254
Cours de Physique générale, par H. Ollivier.....	108
Cours de Physique à l'usage des élèves de Mathématiques spéciales, par J. Lemoine et J. Guyot.....	556 790
Critique de la Connaissance. Les Principes de la Philosophie thomiste, par de Tonquédec.....	1308
Index généralisé, par R. de Montessus de Ballore	1308
Leçons de Chimie Physique, par P.-M. Vézès.....	556 1255
Leçons sur les alliages, par J. Cavalier.....	1254
Offrande à Mercure, par Roszack.....	1308 1311
Problèmes de Physique et de Chimie, par Rivière.....	556 1255
Problèmes de statique graphique et de résistance des matériaux, par Louis Roy	671 1311
Professeur d'avenir (Le), par Ph. Girardet.....	335 561
Standars. Le travail américain vu par un ouvrier français, par M. Dubreuil.....	1308
Système M. T. S. obligatoire depuis le 5 août 1920, par Frécaut J.....	555 1254

L. — BIOGRAPHIE

Sadi Carnot, publié par l'Académie des Sciences.....	671
--	-----

M. — COMMUNICATIONS ET INFORMATIONS DIVERSES

Allocution de M. Imbs, Président sortant.....	11
Allocutions de M. Bunet, Président entrant.....	11 117
Allocution de M. Imbs à la séance d'ouverture de la Semaine d'Octobre 1928.....	13
Assemblée générale extraordinaire du 27 décembre 1928.....	6
Assemblée générale ordinaire du 5 janvier 1929.....	7
Assemblée générale ordinaire du 10 avril 1929.....	342
Attribution pour 1929 de la Médaille Kelvin à M. André Blondel.....	919
Attribution des prix Ancl et Cheux pour 1929.....	919
Attribution du Prix Montefiore pour 1929	1307

	PAGES
Centenaire de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures.....	567
Composition du Bureau et du Comité du groupe Sud-Ouest.....	500
Composition du Bureau et du Comité du groupe Sud-Est.....	502
Création d'une carte spéciale pour les membres perpétuels de la Société..	919
Distinctions obtenues par les Membres de la S. F. E.	1263
Lons à l'Ecole Supérieure d'Electricité..... 117 345	459
Errata à la communication Dauzère sur « La foudre et les lignes élec- triques ».....	920
Errata à la communication de M. Massing sur « l'éclairage des grandes surfaces par projecteurs ».....	920
Inauguration du monument Eiffel.....	459
Membres décédés 9 116 345	1263
Membres titulaires 8 115 226 343 458 566	1261
Nécrologie, M. Dehenne.....	9
Rapport du Comité d'Administration.....	465
Rapport de la Commission des Comptes.....	470
Rapport annuel sur le Laboratoire Central et l'Ecole Supérieure d'Elec- tricité	482
Rapport annuel du Groupe Sud-Ouest.....	495
Renouvellement partiel du Bureau et du Comité.....	105
Réunion ordinaire mensuelle du :	
5 janvier 1929.....	7
2 février 1929.....	115
2 mars 1929 (commune avec le Comité central des Sociétés de T.S.F.)	226
10 avril 1929.....	343
Réunion supplémentaire du 26 avril 1929, commune avec la Société des Ingénieurs civils de France.....	455
Réunion ordinaire mensuelle du 2 mai 1929.....	458
Réunion supplémentaire du 10 mai, commune avec la Société des Ingé- nieurs Civils de France.....	463
Réunion ordinaire mensuelle du 5 juin 1929.....	566
Réunion supplémentaire du 11 octobre 1929, commune avec les Ingénieurs Civils de France	1259
Réunion ordinaire mensuelle du 9 novembre 1929.....	1261
Visite de l'institution of electrical engineers en France, en juin 1929.....	764
Visite des anciens élèves du Polytechnikum de Zurich à la Maison d'Ampère, à Poleymieux.....	1250

IL Y A TRENTE ANS

Compte rendu d'un voyage d'études en Suisse des Elèves de l'Ecole supé- rieure d'Electricité.....	563
Souscription destinée à l'érection d'un monument funéraire à la mémoire de Lucien Gaulard..... 224	340

Table des noms d'auteurs

CITÉS DANS LE TOME IX (4^e SÉRIE)

Communications faites à la Société, p. 1323.
Ouvrages offerts à la Société et Bibliographie, p. 1328.
Il y a trente ans, p. 1330.

COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

	PAGES
ABADIE. — Balisage nocturne des itinéraires d'avions.....	749
ABGRALL. — Présentation de son rapport sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique et discussion du rapport de M. Didiee sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique	248
AILLERET. — Tarification de l'énergie réactive.....	270
AILLERET. — Discussion de son rapport sur la tarification de l'énergie réactive	282
ANDRÉ. — Redresseurs à anode colloïdale.....	961
ANDRIES. — Discussion sur la traction avec récupération.....	307
BARILLOT. — Postes extérieurs.....	843
FAYLE. — De l'Universalité nécessaire du système métrique absolu.....	1020
BEAUVAIS. — Sur les ondes de 10 à 20 cm.....	503
BELFILS. — Discussion du rapport de M. Langlois-Berthelot sur l'échauffement limite des machines électriques et la notion de surcharge.....	25
BELFILS. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	58
BELFILS. — Discussion du rapport de M. de Fisteoye sur les procédés de démarrage des moteurs asynchrones.....	61
BELFILS. — Discussions de son rapport sur les différents systèmes d'excitation et leur influence sur la stabilité de marche des réseaux.....	82
BENOIT. — Discussion du rapport de M. Ledoux sur la propagation des ondes dans les enroulements.....	99
BERGER. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	31
BERGERON. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	54
BETHENOD. — Les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil.....	923
BONNIN. — Discussion de son rapport sur le télétype et du rapport de M. Chauveau sur le téléviste.....	393
BONNIN. — Protection du synchronisme sur les transmissions radiotélégraphiques Baudot-Verdan.....	974
BOSSU. — Discussion du rapport de M. Didiee sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique	254
BOSSU. — Discussion des rapports de MM. Dourgnon et Waguët sur les projecteurs de lumière à miroir parabolique et sur les dispositifs anti-éblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution.....	260

	PAGES
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Langlois-Berthelot sur l'échauffement limite des machines électriques et la notion de surcharge.....	19
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	49
BROGLIE (Maurice de). — Les vérifications récentes de la mécanique ondulatoire dans le cas du mouvement des électrons	695
BRYLINSKI. — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie réactive.....	278
BRYLINSKI. — Discussion du rapport de M. Bunet sur le Chauffage par induction	401
BRYLINSKI. — Discussion sur la Définition et la mesure de la puissance réactive (réponse au questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance.....	424
BUDEANU. — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie réactive.....	289
BUDEANU. — Discussion sur la définition et la mesure de la puissance réactive (réponse au questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance.....	425
BUNET. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	37
BUNET. — Discussion du rapport de M. de Pistoye sur les procédés de démarrage des moteurs asynchrones.....	66
BUNET. — Discussion du rapport de M. Ledoux sur la propagation des ondes dans les enroulements.....	98
BUNET. — Fabrication électrolytique des chlorates alcalins.....	267
BUNET. — Présentation de son rapport sur l'électrolyse du chlorure de sodium avec cathode de mercure.....	267
BUNET. — Discussion de son rapport sur le chauffage par induction.....	402
BUNET. — Emplois des condensateurs dans les Réseaux de distribution....	853
BUNET. — Dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celles de Boucherot.....	1179
CABET. — Discussion du rapport de M. Didiee sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique	252
CABET. — L'éclairage des studios et ses perfectionnements en 1928.....	736
CHATEAU. — Discussion du rapport de M. Didiee sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique	256
CHAUCHAT. — Les alliages à haute perméabilité.....	1091
CHAUMAT. — Vues modernes sur l'électrostatique.....	1168
CHAUVEAU. — Téléphone automatique rural.....	195
CHAUVEAU. — Discussion des rapports de MM. Bonnin et P. Joly sur le télétype et le télémixte.....	389
CHAVASSE. — Note sur les Transformateurs téléphoniques.....	553
CLAVIER. — Discussion des rapports de MM. Bonnin et P. Joly sur le télétype et le télémixte.....	394
COHU. — Compte rendu sur la propagation d'éclairage.....	756
DARMOIS. — Rapport sur l'éclairage par les tubes luminescents.....	1046
DARNAULT. — Forces hydrauliques de l'Afrique équatoriale française.....	1283
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Langlois-Berthelot sur l'échauffement limite des machines électriques et la notion de surcharge.....	24
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Belfils sur les différents systèmes d'excitation et leur influence sur la stabilité de marche des réseaux..	81
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Ledoux sur la propagation des ondes dans les enroulements.....	95
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie réactive.....	287
DARRIEUS. — Discussion sur la définition et la mesure de la puissance réactive (réponse au questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance.....	418

DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Ilivici sur les dispositifs permettant d'obtenir les composantes symétriques des courants ; des tensions ou des puissances dans un système polyphasé sans l'emploi de filtres.....	433
DARRIEUS. — Modèles mécaniques en électrotechnique, leur application aux problèmes de stabilité.....	794
DARRIEUS. — Observation de la communication de M. Mathivet sur les Centrales thermiques américaines.....	935
DAUVILLIER. — Présentation de son rapport sur l'état actuel de la question des unités radiologiques.....	247
LAUZÈRE. — La foudre et les lignes électriques.....	575
DEFLASSIEUX. — Discussion du rapport de M. de Fistoye sur les procédés de démarrage des moteurs asynchrones.....	60
DELLA RICCIA. — Discussion sur la traction avec récupération.....	295
DEMANY. — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie.....	295
DEMANY. — Discussion sur la traction avec récupération.....	314
DEMONTVIGNIER. — Contribution à l'étude du filtrage des courants redressés.....	982
DIDIÉE. — Discussion de son rapport sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique.....	247
DOURGNON. — Discussion du rapport de M. Didiée sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique.....	251
DOURGNON. — Etude sur les projecteurs de lumière à miroir parabolique. Principes applicables aux projecteurs d'automobiles.....	599
DOURGNON. — Dispositifs antiéblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution.....	616
DOURGNON. — Luminaires et éclairage intérieur.....	647
DOURGNON. — Optique des surfaces diffusantes.....	939
DUFOUR. — Discussion de son rapport sur les éclateurs de fours à haute fréquence.....	412
DUMONT. — Discussion du rapport de M. Didiée sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique.....	258
DUNAND. — Méthodes et appareils de mesure des déséquilibres des câbles téléphoniques.....	1213
DUPOUY. — Appareil à lecture directe pour la mesure des champs magnétiques « Gaussmètre ».....	348
DUVAL. — Observation à la communication de M. Mathivet sur les Centrales thermiques américaines.....	935
FALLOU. — Discussion du rapport de M. Belfils sur les différents systèmes d'excitation et leur influence sur la stabilité de marche des réseaux..	78
FALLOU. — Discussion du rapport de M. Ledoux sur la propagation des ondes dans les enroulements.....	92
FALLOU. — Réponse au questionnaire du Comité pour l'amélioration du facteur de puissance de la Conférence des grands réseaux au sujet des effets de la puissance réactive et de ses améliorations.....	101
FALLOU. — Limitation des court-circuits dans les réseaux à haute tension..	883
FAYARD. — Transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes.....	1146
FÉRY. — Remarques au sujet de la communication de M. Rollet sur la Théorie de l'accumulateur au plomb.....	839
FLÉGLER. — Discussion du rapport de M. Ledoux sur la propagation des ondes dans les enroulements.....	87
FONSQUE. — L'industrie des enseignes lumineuses.....	747
GENISSIEU. — Observation à la communication de M. Mathivet sur les Centrales thermiques américaines.....	935
GORCE (de la). — Projet de clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance.....	1187

	PAGES
GIRAULT. — Discussion du rapport de M. Langlois-Berthelot sur l'échauffement limite des machines électriques et la notion de surcharge.....	22
GIRAULT. — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie réactive.....	288
GIRAULT. — Discussion sur la Définition et la mesure de la puissance réactive (réponse au questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance.....	420
GRATZMULLER. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	51
GRATZMULLER. — Discussion sur la traction avec récupération.....	318
GRATZMULLER. — Le freinage électrique en courant continu des trains sur pentes	1069
GUTMANN. — Discussion du rapport de M. Bunet sur le Chauffage par induction	403
GUTMANN. — Discussion du rapport de M. Dufour sur les éclateurs de fours à haute fréquence.....	407
HAAS. — Les progrès de l'optique physiologique.....	728
ILIOVICI. — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie réactive.....	277
ILIOVICI. — Discussion sur la Définition et la mesure de la puissance réactive (réponse au questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance.....	413
ILIOVICI. — Discussion de son rapport sur les dispositifs permettant d'obtenir les composantes symétriques des courants, des tensions ou des puissances dans un système polyphasé sans l'emploi de filtres.....	433
ILIOVICI. — Sur la définition des capacités.....	1158
JOUAUST. — Rapport sur l'état actuel de la photométrie.....	720
JOUAUST. — Procédé permettant la détermination des propriétés magnétiques des tôles aux faibles inductions en courant alternatif.....	1293
JUNG. — Discussion du rapport de M. Grivet sur les moteurs électriques de laminoirs irréversibles à une seule vitesse.....	68
KLONINGER. — Discussion des rapports de MM. Fallou et Iliovici sur la Protection sélective dans les réseaux.....	330
KRIEGER. — Résultats obtenus au laboratoire Alsthom par la comparaison de spintermètres.....	232
LANGLOIS-BERTHELOT. — Discussion de son rapport sur l'échauffement limite des machines électriques et la notion de surcharge.....	17
LAVET. — Remise à l'heure des horloges et commandes à distances diverses par les lignes téléphoniques.....	639
LEBLANC. — Discussion du rapport de M. Didié sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique	248
LEBLANC. — Présentation et discussion de son rapport sur la mesure du rayonnement ultra-violet.....	246
LEBLANC. — Compte rendu de la Réunion de la Commission internationale d'éclairage aux Etats-Unis en septembre 1928.....	525
LEBLANC. — Tubes à néon à basse tension à cathode incandescente.....	655
LEBLANC. — Résultats de quelques essais récents sur les lampes à vapeur de mercure.....	710
LEBLANC. — Le redresseur Rectox à oxyde de cuivre.....	1061
LEDoux. — Discussion de son rapport sur la propagation des ondes dans les enroulements.....	90
LE MONNIER. — Discussion de son rapport sur les moteurs asynchrones synchronisés	97
LEVASSEUR. — Présentation de son rapport sur l'électrolyse aqueuse des chlorures alcalins.....	57
LEVASSEUR. — Présentation de son rapport sur l'électrolyse aqueuse des chlorures alcalins.....	266
LIÉNARD. — Discussion sur la Définition et la mesure de la puissance réactive (réponse au questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance.....	426
MAISONNEUVE. — Lampes à incandescence.....	717
MARTINEAU. — Discussion du rapport de M. de Pistoye sur les procédés de démarrage des moteurs asynchrones.....	66

	PAGES
MASSING. — Eclairage des grandes surfaces par projecteurs.....	625
MATHIEU. — Présentation de son rapport sur un projet de définition des machines à souder par résistance.....	268
MATHIVET. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	36
MATHIVET. — Centrales thermiques américaines.....	927
MATIGOT. — Discussion du rapport de M. Didié sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique	258
MATIGOT. — Discussion des rapports de MM. Dourgnon et Waguet sur les projecteurs de lumière à miroir parabolique et sur les dispositifs antiéblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution.....	264
MERCY. — Considérations sur l'emploi de l'appareil « Télétype » dans les Bureaux télégraphiques à faible trafic et résultats d'expériences.....	705
MESNY. — La phototélégraphie d'amateur.....	511
MORICIÈRE (de la). — Le Taxiphone.....	371
NEU. — Emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et les postes de transformateurs.....	542
NEU. — Réponse aux observations de M. Roth au sujet de sa communication sur l'emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les postes de transformateurs.....	549
NEU. — Utilisation rationnelle de la puissance du vent.....	570
OTTO. — L'ozone et ses applications.....	129
L'ARTRIDGE. — Législation de l'éclairage.....	657
DESTARINI. — Accouplement magnétique sans frottement	1298
PISTOYE (de). — Discussion du rapport de M. Langlois-Berthelot sur l'échauffement limite des machines électriques et la notion de surcharge	26
PISTOYE (de). — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	53
PISTOYE (de). — Discussion de son rapport sur les procédés de démarrage des moteurs asynchrones.....	66
PISTOYE (de). — Discussion du rapport de M. Ledoux sur la propagation des ondes dans les enroulements.....	100
PISTOYE (de). — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie réactive.....	283
PISTOYE (de). — Avantage du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	295
REYNAUD-BONIN. — Discussion des rapports de MM. Bonnin et F. Joly sur le télétype et le télémixte.....	391
REYNAUD-BONIN. — Discussion du rapport de M. Chauveau sur le sférographe.....	395
REYNAUD-BONIN. — Discussion du rapport de M. Gaillez sur le problème des relations entre Paris et les localités de la proche région parisienne.....	396
RIBAUD. — Discussion du rapport de M. Bunet sur le Chauffage par induction	398
ROLLET. — Accumulateur au plomb.....	837
ROTH. — Discussion du rapport de M. Langlois-Berthelot sur l'échauffement limite des machines électriques et la notion de surcharge.....	21
ROTH. — Discussion du rapport de M. Le Monnier sur les moteurs asynchrones synchronisés.....	56
ROTH. — Observations à la communication de M. Neu sur l'emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et les postes de transformateurs.....	548
ROUX. — Discussion du rapport de M. Didié sur l'actinisme réel en cinématographie panchromatique et du rapport de M. Abgrall sur les procédés d'éclairage employés pour les prises de vues sur film panchromatique	251
ROUX. — Discussion des rapports de MM. Dourgnon et Waguet sur les projecteurs de lumière à miroir parabolique et sur les dispositifs antiéblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution.....	263
SAIDMAN. — L'actinothérapie en 1928.....	660

	PAGES
SALOMON. — Evolution des procédés de Fourniture de courant dans les centraux téléphoniques.....	897
SOMAJNI. — Discussion sur la traction avec récupération.....	305
SOULIER. — Les redresseurs de courants alternatifs.....	381
TOURNAYRE. — Discussion sur la définition et la mesure de la puissance réactive (réponse au questionnaire du Comité de la Conférence des grands réseaux pour l'amélioration du facteur de puissance.....	425
TRUFFAUT. — Croissance des végétaux en lumière artificielle.....	810
TURRETTINI. — Expériences sur la production du froid par l'Effet Peltier....	
VAN STAVEREN. — Détermination des courants de court-circuit dans un réseau à l'aide d'un modèle électrique.....	678
VILLEM. — La liaison radiotéléphonique Paris-Buenos-Ayres par ondes courtes projetées.....	1107
VILLIERS. — Discussion du rapport de M. Ailleret sur la tarification de l'énergie réactive.....	284
VITTE. — Etude générale sur les bois employés en électrotechnique.....	1221
WAGUET. — Discussion de son rapport et de celui de M. Dourgnon sur les projecteurs de lumière à miroir parabolique et sur les dispositifs antiéblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution.....	263
WAGUET. — Etude sur les projecteurs de lumière à miroir parabolique. Principes applicables aux projecteurs d'automobiles.....	599
WAGUET. — Dispositifs antiéblouissants applicables aux projecteurs d'automobiles à miroir parabolique de révolution.....	616
WAGUET. — Optique des surfaces diffusantes.....	939
WAGUET. — Sur un procédé permettant la détermination des propriétés magnétiques des tôles aux faibles inductions en courant alternatif....	1293
WETZEL. — Méthodes de calcul dans la technique de l'éclairage (Les).....	650

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

ACADÉMIE DES SCIENCES. — Biographie et manuscrit de Sadi Carnot.....	671
AGUILLOU (L.). — L'Onde électromotrice.....	110
ALLUMINIUM FRANÇAIS (L'). — L'aluminium et ses alliages.....	221
AUCAMUS (E.). — Agenda Dunod 1929 : Travaux publics.....	108
AUDUBERT (R.). — Données numériques d'électricité, magnétisme électrochimie.....	105 337
BARBAGELATA (A.). — Macchine Elettrica.....	1251 1309
BENISCHKE (G. Dr.). — Les isolateurs en porcelaine.....	555
BERNARDEAU (H.). — Cours élémentaire d'électricité industrielle.....	671 1254
BERTHIER (A.). — L'Energie électrique de demain.....	334 558
BIRTWISTLE (G.). — La Nouvelle mécanique des quanta.....	1251
BOLL (M.). — L'électron et les applications de l'électricité.....	671 674
BOLL (M.). — Introduction des quanta. Les équations de la mécanique et de l'électronique.....	789
BOLL (M.). — Matière, électricité, radiations.....	334 673
BRICOUT (P.). — Ondes et électrons.....	671 1309
BROGLIE (Maurice et Louis de). — Introduction à la Physique des Rayons X et gamma.....	105 672
BROGLIE (L. de). — Ondes et mouvements.....	555
EUFFAT. — Données numériques d'électricité, magnétisme, électrochimie.....	105 337
BUJOIU (I.). — Quelques considérations générales sur l'utilisation rationnelle des lignites de Roumanie.....	557
CAMPBELL (N.-R.). — La théorie électrique moderne.....	108
CAMPBELL (N.-R.). — Théorie quantique des spectres. La Relativité (supplément à l'ouvrage « La théorie électrique moderne »).....	108
CAVALIER (J.). — Leçons sur les alliages métalliques.....	1254
CHAMBRE SYNDICALE DES FORCES HYDRAULIQUES DE L'ELECTROMÉTALLURGIE, DE L'ELECTROCHIMIE et des industries qui s'y rattachent (annuaire 1928)...	335
CHAMPLY (R.). — Comment on devient fraiseur.....	555
CHWOLSON (O.-D.). — Traité de Physique.....	673

	PAGES
CLIFTON. — Nouveau dictionnaire anglais-français, français-anglais.....	221
COLARDEAU (E.). — Approximations dans les mesures physiques et dans les calculs numériques qui s'y rattachent.....	790
COTTER (A.). — La Corporation de l'Acier aux Etats-Unis.....	555
DAHLGREN (F.). — A general electromagnetic theory of electric machines..	1310
DARMOIS (E.). — Leçons sur la Conductibilité des Electrolytes.....	555
DEFRETIN (A.). — Cours d'Electricité industrielle (Tome 1 : L'Electricité dans la Science de l'Ingénieur).....	791
DROUIN (F.). — Centrales électriques.....	107
DUBREUIL (H.). — Standars. Le travail américain vu par un ouvrier français.	1308
DURAND (L.). — Données numériques d'électricité, magnétisme, électrochimie	337
ENGELHARDT (A. Dr.). — Câbles téléphoniques pour longues distances.....	336
FERRIER (R.). — Comment aborder le problème de la Matière?.....	555
FICHTER (R.-M.). — Les Compteurs de l'Electricité.....	449
FOEX. — Données numériques d'électricité, magnétisme, électrochimie.	337
FOEX. — Le magnétisme.....	334
FORTRAT (R.). — Introduction à l'étude de la Physique théorique....	791
FOURCAULT (L.-D.). — Agenda Dunod 1929 « Electricité » (Aide-mémoire pratique de l'électricien).....	339
FRÉCAUT (J.). — Système M. T. S. obligatoire depuis le 5 août 1920.....	555
FREI (K.). — Zur theorie des Fernsprechverkehrs.....	337
FULMEN. — Manuel pratique des batteries de démarrage.....	108
GALINE (L.). — Eclairage.....	1251
GIRARDET (Ph.). — Les Affaires et les Hommes.....	562
GIRARDET (Ph.). — Le Professeur d'avenir.....	335
GLAZEBROOK (R.). — A Dictionary of applied physics.....	449
GUYOT (J.). — Cours de Physique à l'usage des élèves de mathématiques spéciales	790
HACAULT (G.). — Applications de l'Electricité aux Mines.....	789
HARDY (A.). — Protection contre les effets nuisibles de l'électricité.....	110
HERLITZ (J.). — Elektriska Kraftöverföringars dynamiska stabilitet.....	1310
IZART (J.). — Agenda Dunod 1929 « Construction mécanique ».....	108
IZART (J.). — Agenda Dunod 1929 « Physique Industrielle ».....	339
JUMAU (L.). — Étude résumée des accumulateurs électriques.....	107
KISTER (G.). — Nouveau dictionnaire allemand-français, français-allemand..	221
LACOMBE. — Nouveau dictionnaire français-italien, italien-français.....	221
LANESCU (A.). — Intrebuintarea pacurei ca combustibil la C. F. R.....	557
LANGLEIN (J.-M.). — Nouveau dictionnaire anglais-français, français-anglais.	221
LASAREFF (F.). — Théorie ionique de l'excitation des tissus vivants.....	337
LEMOINE (J.). — Cours de Physique à l'usage des élèves de mathématiques spéciales	790
LEVASSEUR (A.). — L'électrochimie et l'électrometallurgie.....	223
LOMBARDI (L.). — Principi Scientifici di Elettrotecnica.....	1251
LOMBARDI (L.). — Corso teorico-pratico di Elettrotecnica.....	1251
LUNDHOLM (R.). — Das rechenen mit vektoren in der Electro-Technik.....	1310
MAREC (E.). — L'Electricité à la Maison.....	1308
MASSACRE (de). — Données numériques d'électricité, magnétisme, électrochimie	337
MAURER (P.). — Comment utiliser l'électricité dans la maison.....	221
MAXWELL (J.-C.). — The Scientific papers.....	107
MENSCH. — Nouveau dictionnaire allemand-français, français-allemand....	221
MESNY (R.). — Données numériques de radio-électricité.....	107
MONTESUS DE BALLORE (R.). — Index généralis.....	1308
MORISE (N.). — Manuel du dessinateur industriel.....	xxx
NERVILLE (F.-G. de). — Protection contre les effets nuisibles de l'électricité.	110
OLLIVIER (H.). — Cours de Physique générale.....	108
OKOMOTO (T.). — Theoretical and Experimental Researches on Electric Resistance Welding.....	790
PROCA (Al.). — Sur la théorie des quanta de lumière.....	451
FRUNIER (F.). — Newton, Maupertuis et Einstein.....	1251
REMAURY (A.). — Houille Blanche.....	334
	560

	PAGES
REMAURY (A.). — Electricité. Notions de droit et décisions de jurisprudence.....	334 559
RIVIÈRE (J.-Ch.). — Problèmes de Physique et de Chimie.....	556 1255
ROLLET (A.-F.). — Recherches sur les réactions chimiques ayant pour siège les électrodes dans les phénomènes d'électrolyse et sur quelques combinaisons métalliques qui prennent naissance dans ces conditions.....	1309 1311
ROSZAK (Ch.). — L'offrande à Mercure.....	1308 1311
ROTH (A.). — Hochspannungs technik.....	222
ROTTECK (K.). — Nouveau dictionnaire allemand-français et français-allemand.....	221
ROUÈDE (F.). — Nouveau dictionnaire français-italien, italien-français....	221
ROY (L.). — Problèmes de statique graphique et de résistance des matériaux.....	671 1311
SACKLowski (A. Dr.). — Die Ausbreitung der elektromagnetischen.....	337
SAINEANU (C.). — Dictionar Francez-Roman.....	334
SAINEANU (C.). — Dictionar Roman-Francez.....	334
SAINT-PAUL (B.). — Eclairage.....	1251
SALOMON (C.). — Introduction à la théorie des quanta. Les équations de la mécanique et de l'électronique.....	789
SALVA (V.). — Nuevo diccionario frances-espanol y espanol-frances.....	251
SCHLOMANN (A.). — Dictionnaires techniques illustrés.....	108 338
SÉVIN (E.). — Le temps absolu et l'Espace à quatre dimensions.....	108
SIEMENS JAHRBUCH 1928.....	334 560
SYNDICAT DU CAOUTCHOUC. — Encyclopédie du Caoutchouc et des Industries qui s'y rattachent.....	221 450
TONQUÉDEC (de). — La critique de la connaissance. Les principes de la Philosophie Thomiste.....	318
TRIALS (E.). — Report of tabulating the results of Heat.....	558
TRIBOT-LASPIÈRE (J.). — L'industrie de l'Acier en France.....	555 1310
TROLLEY DE PRÉVAUX (F.). — Electricité. — Notions de droit et décisions de jurisprudence.....	334 559
UNION INTERNATIONALE DES PRODUCTEURS ET DISTRIBUTEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. — Compte rendu du 2 ^e Congrès international tenu à Paris du 5 au 16 juillet 1928.....	671
UNION INTERNATIONALE DE TRAMWAYS, DE CHEMINS DE FER D'INTÉRÊT LOCAL ET DE TRANSPORTS PUBLICS AUTOMOBILES. — Comptes rendus détaillés du XXI ^e Congrès international tenu à Rome du 6 au 13 mai 1928.....	675
UNION DES SYNDICATS DE L'ÉLECTRICITÉ. — Essais d'interrupteurs dans l'huile en 1927.....	221 450
VASILESCO (G.-C.). — Problème de la canalisation du secteur des cataractes du Bas-Danube.....	557
VÈZES (F.-M.). — Leçons de Chimie Physique.....	556 1255
VIDMAR (M.). — La Construction économique de la machine électrique....	555
WEISS (F.). — Le Magnétisme.....	334 561
WERNER (O.). — Empfindliche Galvanometer fur Gleich und Wechselstrom.....	1251
WINZHEIMER (R.). — Übertragungs-technik.....	1251

IL Y A TRENTE ANS

ALIAMET. — Discussion de la communication de M. Gosselin X sur les récents dispositifs pour l'éclairage par arc.....	1312
ALIAMET et SARTIAUX. — Les applications industrielles des transformateurs redresseurs de Maurice Leblanc dans les installations de la Compagnie des Chemins de fer du Nord.....	676
BOCHET. — Les parafoudres sur les canalisations électriques.....	452
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Brunswick sur les coupe-circuits à interrupteurs.....	112
BRUNSWICK. — Les coupe-circuits à interrupteurs.....	112
BRUNSWICK. — Discussion de la communication de M. Picou sur la réaction d'induit dans les machines dynamo-électriques.....	340
DRAVEAU. — La variation de la résistance du platine en fonction de la température.....	1256

PAGES

GOSSELIN (X.). — Les récents dispositifs pour l'éclairage par arc. Discussion MM. Aliamet, Hégner et Sartiaux	1312
GROSSELIN. — Discussion de la communication de M. Brunswick sur les coupe-circuits à interrupteurs.....	224
GUTTON. — La vérification expérimentale de l'identité des vitesses de propagation des ondes hertziennes dans l'air et le long des fils.....	792
HÉGNER. — Discussion de la communication de M. Gosselin X. sur les récents dispositifs pour l'éclairage par arc	1312
HILLAIRET. — Discussion de la communication de M. Brunswick sur les coupe-circuits à interrupteurs.....	112
HOSPITALIER. — L'interrupteur Vehnelt et ses applications.....	563
KORDA. — Discussion de la communication de M. Ficou sur la réaction d'induit dans les machines dynamo-électriques.....	340
LAPORTE. — Etude de la répartition lumineuse des lampes à arc, spécialement des lampes munies de globes et de réflecteurs.....	676
LAURIOL. — L'utilisation de la chaleur dégagée par la combustion des ordures ménagères pour la production de l'électricité	1312
LEBLANC (Maurice). — Etude sur la Transmission et la Distribution de l'énergie par les courants alternatifs (suite).....	224 340
O'KEENAN. — Le moteur O'K.....	792 1256
PICOU (R.-V.). — La réaction d'induit dans les machines dynamo-électriques.	340
SARCIA. — Les tramways à accumulateurs de la Ville d'Ostende.....	224
SARTIAUX (E.) et ALIAMET. — Les applications industrielles des transformateurs redresseurs de Maurice Leblanc dans les installations de la Compagnie des Chemins de fer du Nord.....	676
SARTIAUX. — Discussion de la communication de M. X. Gosselin sur les récents dispositifs pour l'éclairage par arc	1312
ZETTER. — Discussion de la communication de M. Brunswick sur les coupe-circuits à interrupteurs.....	224

Bl. En.
Lini.

v

c

y

o

d

t

h

a

f

t

a

h

a

